

**Pedro Miguel Cardoso Ferreira**

**Evolução da Temperatura em Elementos de  
Aço Sujeitos ao Fogo**

**Lisboa  
2011**

## **“Evolução da Temperatura em Elementos de Aço Sujeitos ao Fogo”**

**Copyright ©2011 de Pedro Ferreira, FCT/UNL, UNL.**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

**UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil

# **Evolução da Temperatura em Elementos de Aço Sujeitos ao Fogo**

**Pedro Miguel Cardoso Ferreira**

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Ramo de Estruturas

Orientador Científico: Professor Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida

Júri:

Presidente: Professor Doutor Corneliu Cismasiu

Arguente: Professor Doutor Rodrigo Moura Gonçalves

2011

## Agradecimentos

A presente dissertação foi concluída devido à contribuição de várias pessoas a quem não posso deixar de dar uma palavra de agradecimento.

Ao Professor Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida pelo seu apoio e disponibilidade, pois foram totais, ao mesmo tempo que me deu oportunidade de trabalhar de forma autónoma e aprender com os meus erros, acompanhou de perto todo o processo e as suas sugestões e recomendações contribuíram em grande parte para a dissertação aqui apresentada.

A toda a minha família e em particular aos meus pais e avós, aos primeiros pelo esforço pessoal que fizeram e fazem a fim de me proporcionar um ambiente adequado ao meu desenvolvimento como pessoa e como estudante, aos meus avós, por todo o amor e sábios ensinamentos que sempre transmitiram ao longo da vida, é também vosso este trabalho.

Agradeço à Diana Palma de forma especial, pois além do apoio e compreensão que se espera de uma companheira, contribuiu para a elaboração da dissertação com as suas sugestões e críticas.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer a todos meus colegas e amigos, particularizando os que começaram como colegas e se tornaram grandes amigos, Alexandra e Nuno, Diogo Pereira, Márcio Costa e claro ao Pedro Clara, que além de todo o apoio e camaradagem, proporcionaram momentos de descontração e diversão únicos e memoráveis.



## Resumo

O estudo do comportamento de estruturas de aço no caso da ocorrência de um incêndio é um tema relativamente recente em Portugal, pois a quase totalidade da construção até à data tem sido desenvolvida noutros materiais como o betão e alvenarias. Contudo, em parte devido à abertura dos mercados do aço Europeus e Mundiais, mas também devido ao aparecimento de nova regulamentação (como os Eurocódigos), a construção metálica e mista tem vindo a ganhar espaço na construção civil nacional.

A presente dissertação tem como principal objectivo estudar a evolução da temperatura em secções transversais de elementos estruturais de aço sujeito ao fogo, tendo em vista uma avaliação das equações propostas pelo método simplificado de cálculo exposto no Eurocódigo 1 e no Eurocódigo 3, prestando também atenção a situações em que não ocorre aquecimento uniforme por todos os lados do elemento.

São apresentados vários casos de estudo, analisados com base no Método dos Elementos Finitos; mais concretamente, é utilizado o programa SAFIR-2007, amplamente conhecido na comunidade científica, bem como métodos analíticos simplificados preconizados no Eurocódigo 1 e no Eurocódigo 3.

Apresentam-se comparações entre os resultados do programa de cálculo automático, SAFIR - 2007 e o Método Simplificado, de modo a se compreenderem as limitações das hipóteses adoptadas pelo Eurocódigo 3.

**Palavras-chave:** Elementos de aço, Incêndio, Análise Térmica, Eurocódigo 3.



## **Abstract**

The study of the behaviour of steel structures in the event of a fire is a relatively recent theme in Portugal, because almost all the construction until this date has been developed in other materials such as concrete and masonry. However, partly due to the opening of European and World steel markets, but also due to the emergence of new regulations (such as the Eurocodes), steel and composite construction has earned its place in national construction.

The main objective of the present dissertation is to study the evolution of temperature in cross sections of structural steel subjected to fire, aiming at evaluating the equations from the simplified calculation method set out in Eurocode 1 and Eurocode 3, and also paying attention to situations where uniform heating does not occur on all sides of the element.

Several case studies are presented and analyzed, based on the finite element method. More specifically, use is made of the program SAFIR-2007, widely known in the scientific community, well as simple analytical methods recommended in Eurocode 1 and Eurocode 3.

Comparisons are presented between the results of the computer program SAFIR - 2007 and the Simplified Method, in order to understand the limitations of the assumptions adopted by Eurocode 3.

**Keywords:** Steel Elements, Fire, Thermal Analysis, Eurocode 3.





## Simbologia

### Letras maiúsculas do alfabeto latino

$A_m$	área da superfície de um elemento directamente aquecida pelo fogo por unidade de comprimento;
$A_p$	área apropriada do material de protecção contra incêndio por unidade comprimento;
$A_m/V$	factor de massividade para os elementos de aço não protegidos;
$A_p/V$	factor de massividade para os elementos de aço protegidos;
$P$	perímetro do elemento exposto ao fogo;
$Q$	quantidade de calor libertado num incêndio;
$\dot{Q}$	calor gerado internamente por unidade de volume e de tempo;
$Q_c$	quantidade de calor por convecção;
$T_{corpo}$	temperatura do corpo;
$T_\infty$	temperatura do fluido em movimento;
$V$	volume do perfil por unidade de comprimento.

### Letras minúsculas do alfabeto latino

$b$	absortividade térmica;
$c$	calor específico;
$c_a$	calor específico do aço dependente da temperatura;
$c_p$	calor específico do material de protecção contra incêndio, independente da temperatura;
$d_p$	espessura do material de protecção contra incêndio;
$\dot{h}_{net}$	fluxo de calor efectivo por unidade de área;
$\dot{h}_{net,c}$	fluxo de calor efectivo por convecção por unidade de área;
$\dot{h}_{net,d}$	valor de calculo do fluxo de calor efectivo por unidade de área;
$\dot{h}_{net,r}$	fluxo de calor efectivo por radiação por unidade de área;
$k_{sh}$	factor de correcção para o efeito de sombra;
$l$	comprimento;
$p$	valor de cálculo do teor de humidade do material de protecção contra incêndio;
$q$	fluxo por calor;
$q_c$	fluxo de calor por convecção por unidade de área;
$q_r$	fluxo de calor por radiação por unidade de área;
$q_{cr}$	fluxo de calor simultaneamente por convecção e radiação;
$t$	espessura do perfil;

$t$	tempo de exposição ao incêndio;
$t_v$	tempo de atraso devido ao teor de humidade existente no material de protecção ao fogo.

### **Letras maiúsculas do alfabeto grego**

$\Delta$	prefixo para incremento;
$\Delta l$	alongamento no aço devido à temperatura;
$\Delta l/l$	extensão devido à variação de temperatura;
$\Delta t$	intervalo de tempo;
$\Delta\theta_{a,t}$	variação de temperatura no perfil não protegido durante o intervalo de tempo $\Delta t$ ;
$\Delta\theta_{g,t}$	variação da temperatura ambiente dos gases durante o intervalo de tempo $\Delta t$ ;
$\Gamma_\theta$	condições de contorno de temperatura na superfície;
$\Gamma_q$	condições de contorno de fluxo na superfície;
$\Gamma_c$	condições de contorno de convecção na superfície;
$\Phi$	factor de configuração geométrico.

### **Letras minúsculas do alfabeto grego**

$\alpha$	difusividade térmica;
$\alpha_c$	coeficiente de transferência de calor por convecção;
$\alpha_r$	coeficiente de transferência de calor por radiação;
$\alpha_{cr}$	coeficiente de transmissão de calor combinado de convecção/ radiação;
$\varepsilon$	emissividade;
$\varepsilon_f$	emissividade do compartimento de incêndio;
$\varepsilon_m$	emissividade da superfície do elemento;
$\theta$	temperatura;
$\theta_a$	temperatura do aço;
$\theta_g$	temperatura dos gases no compartimento de incêndio;
$\theta_m$	temperatura do perfil metálico;
$\theta_r$	temperatura de radiação na vizinhança do perfil;
$\theta_\infty$	temperatura ambiente;
$\lambda$	condutividade térmica;
$\lambda_a$	condutividade térmica do aço;
$\lambda_p$	condutividade térmica do material de protecção;
$\rho$	densidade do material;
$\rho_a$	peso volúmico do aço;

$\rho_p$  densidade do material de protecção;

$\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann,  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ [W/(m}^2\text{K}^4\text{)]}$ .



## Índice

1.	Introdução .....	1
1.1.	Comentários Gerais .....	1
1.2.	Justificação .....	3
1.3.	Objectivos .....	4
1.4.	Metodologia.....	5
1.5.	Apresentação do Trabalho .....	5
2.	Incêndio .....	7
2.1.	Introdução .....	7
2.2.	Modelo de Incêndio Real.....	8
2.3.	Modelo de Incêndio Natural .....	10
2.4.	Modelos de Incêndio Baseado em Curvas Nominais .....	12
2.4.1.	Curva de incêndio padrão, ISO 834.....	13
2.4.2.	Curva de incêndio para elementos exteriores .....	14
2.4.3.	Curva de incêndio de hidrocarbonetos .....	14
3.	Mecanismos de Transferência de Calor .....	17
3.1.	Transferência de Calor por Condução .....	17
3.2.	Transferência de Calor por Convecção .....	22
3.3.	Transfêrencia de Calor por Radiação .....	23
4.	Propriedades dos Materiais de Interesse.....	25
4.1.	Propriedades Térmicas dos Aços Estruturais .....	25
4.1.1.	Extensão térmica.....	25
4.1.2.	Calor específico .....	26
4.1.3.	Condutividade térmica.....	27
4.2.	Materiais de Protecção Contra o Fogo .....	28
4.2.1.	Betão.....	31

4.2.2.Gesso .....	31
4.2.3.Tintas intumescentes .....	32
4.2.4.Vermiculite e perlite.....	33
4.2.5.Fibras minerais.....	33
4.2.6.Argila expandida ou betão leve.....	34
5. Evolução da Temperatura no Aço.....	35
5.1.Métodos Avançados de Cálculo.....	35
5.1.1.Equação de condução de calor e condições de fronteira.....	36
5.1.2.Discretização por elementos finitos .....	38
5.1.2.Campo de temperaturas obtido por elementos finitos – SAFIR 2007 .....	39
5.2.Métodos Simplificados de Cálculo – Equações Simplificadas do Eurocódigo 3 .....	43
5.2.1.Factor de massividade .....	43
5.2.2.Elementos não protegidos .....	46
5.2.3.Elementos protegidos.....	73
6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros .....	83
7. Bibliografia .....	85
Anexos .....	89
Anexo I – Tabela Factores de Massividade .....	91
Anexo II - Ábacos.....	99

## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Procedimentos alternativos de cálculo [Fonte: Eurocódigo3] .....	2
Figura 1.2 - Factores de massividade para elementos de aço não protegidos [Fonte: Eurocódigo 3] .....	4
Figura 2.1 - Curva temperatura x tempo de um incêndio real [Fonte: MOURA (2005)] .....	8
Figura 2.2 - Triângulo do Fogo [Fonte: CLARET (2000)] .....	9
Figura 2.3 - Modelo de um incêndio natural [Fonte: KAEFER (2006)] .....	11
Figura 2.4 - Estrutura metálica exterior, IADE, Lisboa .....	14
Figura 2.5 - Incêndio de hidrocarbonetos nas torres World Trade Center [Fonte: LUDLUM (2002)] .....	15
Figura 2.6 - Colapso das torres World Trade Center [Fonte: LUDLUM (2002)] .....	15
Figura 2.7 - Curvas nominais definidas no Eurocódigo 1 [Fonte: Eurocódigo 1] .....	16
Figura 3.1 – Fluxo de calor num elemento tridimensional infinitesimal [Fonte: MENDES (2004)] .....	19
Figura 3.2 – Arrefecimento convectivo de um corpo aquecido [Fonte: MENDES (2004)] ....	22
Figura 4.1 – Extensão térmica do aço carbono em função da temperatura [Fonte: Eurocódigo 3] .....	26
Figura 4.2 – Calor específico do aço carbono em função da temperatura [Fonte: Eurocódigo 3] .....	27
Figura 4.3 – Gráfico da condutibilidade térmica do aço carbono em função da temperatura [Fonte: Eurocódigo 3] .....	28
Figura 4.4 - Protecções clássicas das estruturas de aço [Fonte: RIBEIRO (2004)] .....	29
Figura 4.5 – Utilização do betão como material de protecção térmica [Fonte: MENDES (2004)] .....	31
Figura 4.6– Utilização de gesso como material de protecção térmica (isolamento da caixa de elevadores) [Fonte: MENDES (2004)] .....	32
Figura 4.7 – Tinta intumescente expandindo sob acção térmica [Fonte: MENDES (2004)] ...	32
Figura 4.8 - Vermiculite em diferentes utilizações: (a) Vermiculite na forma de flocos [Fonte: MENDES (2004)]; (b) Argamassa à base de vermiculite [Fonte: DIAS (2002)] .....	33
Figura 4.9 – Aplicação de fibras projectadas e seu aspecto final [Fonte: DIAS (2002)] .....	34
Figura 5.1 – Pontos utilizados para comparação de resultados .....	40
Figura 5.2 – Erro em função do tempo, para HEB100 sujeito à curva ISO - 834 .....	41
Figura 5.3 – Erro em função do tempo, para HEB100 sujeito à curva ISO – 834 .....	41



Figura 5.4 – Erro em função do tempo, para HEB400 sujeito à curva ISO – 834.....	41
Figura 5.5 – Erro em função do tempo, para HEB400 sujeito à curva ISO – 834.....	41
Figura 5.6 – Influência da tolerância de cálculo na evolução da temperatura .....	42
Figura 5.7 – Malha utilizada na modelação: (a) Utilizando o SAFIRWIZARD; (b) Utilizando o GID 10.0.4.....	43
Figura 5.8 - Factor de massividade para elementos metálicos sem revestimento contra fogo [Fonte: Eurocódigo 3] .....	44
Figura 5.9 – Influência do factor de massividade na temperatura de perfis metálicos [Fonte: VILA REAL (2003)].....	45
Figura 5.10 – Factor de massividade para elementos metálicos com protecção contra incêndio [Fonte: Eurocódigo 3] .....	45
Figura 5.11 Transferência de calor por radiação entre duas áreas infinitesimais [Fonte: Eurocódigo 1].....	48
Figura 5.12 - Erro em função do tempo, para HEB600 sujeito à curva ISO – 834 .....	49
Figura 5.13 – Quatro faces expostas ao fogo .....	50
Figura 5.14 – Evolução da temperatura para diferentes tipos de perfis HEB .....	50
Figura 5.15 – Evolução da temperatura para diferentes tipos de perfis IPE.....	51
Figura 5.16 – Perfil HEB100 - Método Simplificado VS SAFIR .....	52
Figura 5.17 – Perfil HEB200 - Método Simplificado VS SAFIR .....	52
Figura 5.18 – Perfil HEB400 - Método Simplificado VS SAFIR .....	53
Figura 5.19 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR .....	53
Figura 5.20 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR .....	54
Figura 5.21 – Perfil IPE100 - Método Simplificado VS SAFIR .....	55
Figura 5.22 – Perfil IPE200 - Método Simplificado VS SAFIR .....	55
Figura 5.23 – Perfil IPE400 - Método Simplificado VS SAFIR .....	56
Figura 5.24 – Perfil IPE600 - Método Simplificado VS SAFIR .....	56
Figura 5.25 – Perfil IPE600 - Método Simplificado VS SAFIR .....	57
Figura 5.26 – Três faces expostas ao fogo .....	58
Figura 5.27 – Perfil HEB100 - Método Simplificado VS SAFIR .....	58
Figura 5.28 – Perfil HEB200 - Método Simplificado VS SAFIR .....	59
Figura 5.29 – Perfil HEB400 - Método Simplificado VS SAFIR .....	59
Figura 5.30 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR .....	60
Figura 5.31 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR .....	61

Figura 5.32 – Três faces expostas ao fogo.....	61
Figura 5.33 – Malha adoptada para perfil HEB600 sob laje de betão.....	62
Figura 5.34 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR.....	62
Figura 5.35 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR.....	63
Figura 5.36 – Perfil IPE100 - Método Simplificado VS SAFIR.....	66
Figura 5.37 – Perfil IPE200 - Método Simplificado VS SAFIR.....	67
Figura 5.38 – Perfil IPE400 - Método Simplificado VS SAFIR.....	67
Figura 5.39 – Perfil IPE600 - Método Simplificado VS SAFIR.....	68
Figura 5.40 – Malha adoptada para perfil IPE600 sob uma laje de betão.....	69
Figura 5.41 – Perfil IPE600 - Método Simplificado VS SAFIR.....	69
Figura 5.42 – Pontos utilizados para comparação de resultados .....	70
Figura 5.43 – Perfil CHS144x5 - Método Simplificado VS SAFIR .....	71
Figura 5.44 – Perfil CHS244x16 - Método Simplificado VS SAFIR .....	71
Figura 5.45 – Perfil CHS508x16 - Método Simplificado VS SAFIR .....	72
Figura 5.46 – Processos distintos de aplicação de protecção ao fogo [Fonte: RIBEIRO (2004)] .....	73
Figura 5.47 – Efeito da consideração de humidade no material de protecção .....	74
Figura 5.48 - Erro em função do tempo, para HEB600 sujeito à curva ISO - 834.....	76
Figura 5.49 – Quatro faces expostas ao fogo.....	76
Figura 5.50 – Malha adoptada para perfil HEB600 protegido com fibra mineral no contorno	77
Figura 5.51 – Perfil HEB200 - Método Simplificado VS SAFIR.....	77
Figura 5.52 – Perfil HEB400 - Método Simplificado VS SAFIR.....	78
Figura 5.53 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR.....	78
Figura 5.54 – Três faces expostas ao fogo.....	79
Figura 5.55 – Malha adoptada para perfil HEB600 protegido com fibra mineral no contorno, sob uma laje de betão.....	79
Figura 5.56 – Perfil IPE600 - Método Simplificado VS SAFIR.....	80



## Índice de Tabelas

Tabela 4.1 – Valores das propriedades térmicas para diferentes materiais de protecção [Fonte: VILA REAL (2003)] .....	30
Tabela 5.1 - Resultados dos erros para diferentes passos de cálculo .....	40
Tabela 5.2 - Coeficiente de transferência de calor por convecção [Fonte Eurocódigo 3].....	47
Tabela 5.3 - Factor de massividade $A_m / V$ para perfis HEB não protegidos – 4 faces expostas ao fogo .....	50
Tabela 5.4 - Factor de massividade $A_m / V$ para perfis IPE não protegidos – 4 faces expostas ao fogo .....	51
Tabela 5.5 - Factor de massividade $A_m / V$ para perfis HEB não protegidos – 3 faces expostas ao fogo .....	58
Tabela 5.6 – Comparação da evolução da temperatura para perfil HEB600 .....	64
Tabela 5.7 - Factor de massividade $A_m / V$ para perfis IPE não protegidos – 3 faces expostas ao fogo .....	66
Tabela 5.8 - Dimensões e factor de massividade $A_m / V$ para perfis CHS não protegidos .....	70
Tabela 5.9 - Propriedades térmicas para da fibra mineral [Fonte: VILA REAL (2003)].....	77
Tabela 5.10 – Comparação da evolução da temperatura para perfil HEB600 .....	81



## 1. Introdução

### 1.1.Comentários Gerais

O incêndio é um dos fenómenos mais temidos pela humanidade, pois, se não controlado em tempo útil, pode culminar em graves consequências. Assim, os incêndios requerem uma atenção especial. WANG (2002), afirma que, até recentemente, as medidas de combate a incêndios em edificações têm seguido procedimentos que evoluíram em resposta a desastres ocorridos anteriormente. Relativamente às exigências de resistência ao fogo de elementos estruturais de aço em situação de incêndio, a maioria dos regulamentos e códigos normativos internacionais ainda têm por fundamentos base, ensaios de elementos isolados em fornos, sendo disso exemplo os Eurocódigos utilizados na Europa, as Normas Brasileiras e as International Building Codes, utilizados nos Estados Unidos.

No passado, os procedimentos consagrados em regulamentos e códigos normativos de segurança contra incêndios adoptavam normalmente uma abordagem “*prescritiva*” para propostas de dimensionamento que em geral se traduzia em projectos não viáveis a nível económico. Contudo, no contexto internacional, a regulamentação de segurança contra incêndio em edificações tem evoluído no sentido de se libertar progressivamente desta abordagem, passando a basear-se mais no desempenho dos elementos construtivos expostos a situações de incêndios reais.

Em VILA REAL (2003), são citados aspectos que permitem identificar a diferença entre uma abordagem *prescritiva* e outra baseada no *desempenho*, com relação ao comportamento de uma estrutura de em situação de incêndio. Assim numa abordagem *prescritiva* limita-se, por exemplo, a temperatura do material a um valor denominado “*temperatura crítica*”, isto é, a temperatura de colapso do elemento quando exposto a uma curvas “temperatura - tempo” normalizada.

Esta abordagem tem por base o pressuposto de que, para temperaturas superiores à denominada “*temperatura crítica*”, uma dada estrutura não é segura. Com este procedimento, a avaliação da temperatura do material estrutural (por exemplo, aço) é o objectivo último e, neste caso, de principal interesse. Não são levadas em conta circunstâncias particulares da estrutura sujeita ao incêndio, tais como:

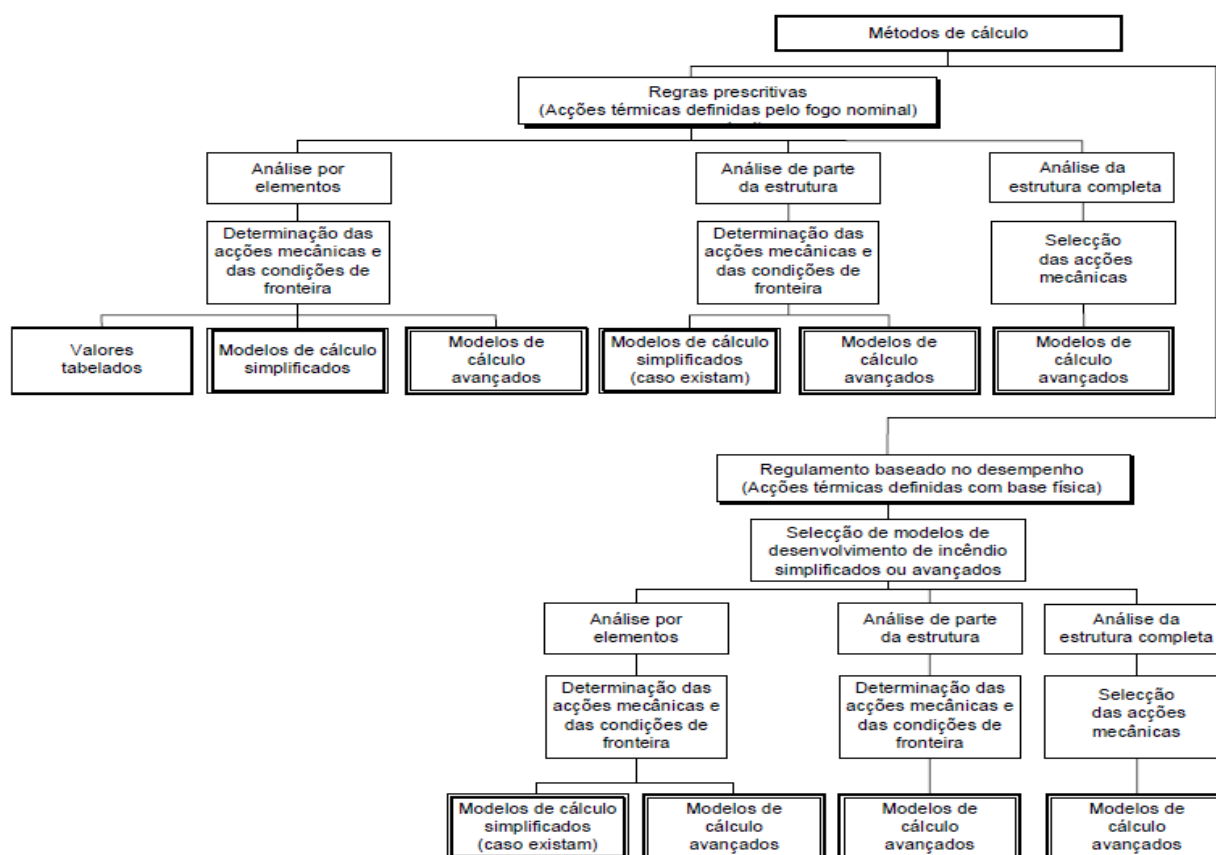
- o tipo de incêndio;
- as consequências da exposição ao fogo;
- condições de carregamento;
- interacção entre os vários elementos estruturais.

Também segundo VILA REAL (2003), numa abordagem baseada no *desempenho*, todos os factores são ponderados e a temperatura do material é apenas uma das muitas variáveis envolvidas. Esta abordagem, apesar de se traduzir em procedimentos mais complexos, permite obter uma resposta da

estrutura, quando submetida a elevadas temperaturas, mais representativa da que se verifica nas reais situações de incêndio.

De acordo com WANG (2002), a engenharia de segurança contra incêndios é bastante complexa e os benefícios da utilização destes novos métodos de análise são enormes, razão pela qual têm surgido em todo o mundo um forte movimento no sentido da adopção desses métodos.

Neste contexto aparecem os Eurocódigos, que, segundo VILA REAL (2003), admitem a utilização de procedimentos prescritivos ou de procedimentos baseados no desempenho. A Figura 1.1 descreve os procedimentos de cálculo preconizados nos Eurocódigos,



**Figura 1.1 - Procedimentos alternativos de cálculo [Fonte: Eurocódigo3]**

A análise térmica, através da qual se determina o campo de temperaturas no elemento estrutural, pode ser efectuada por meio de métodos analíticos simplificados, de métodos numéricos ou através de ensaios experimentais.

Os primeiros, com base em expressões indicadas em normas, ainda que possam garantir a segurança estrutural, não garantem economia no projecto de dimensionamento, pois para estes métodos a temperatura é considerada constante em toda a área do elemento estrutural. Nestes métodos, partindo da curva temperatura - tempo dos gases quentes resultantes do incêndio, é possível determinar-se a

temperatura no elemento estrutural, com base nas expressões de transferência de calor. Essas expressões são fornecidas para elementos com ou sem protecção contra incêndio. Numa verificação simplificada, assumem especial importância os conceitos de factor de massividade (uma característica geométrica do perfil), e de temperatura crítica (valor da temperatura uniforme para o qual os esforços solicitantes e resistentes se igualam), bem como o tipo de protecção.

No respeitante aos métodos numéricos, estes necessitam de programas de computador com precisão adequada, sendo que nos casos específicos de elementos de aço em contacto com alvenarias ou lajes de betão, as diferenças entre os resultados obtidos por estes métodos e os fornecidos pelos Métodos Simplificados podem ser relevantes, dada a interacção com matérias que apresentam baixas condutividades térmicas relativamente ao aço, sendo estes capazes de absorver o calor e proteger as faces dos perfis adjacentes.

O programa utilizado nesta dissertação foi o SAFIR-2007, programa desenvolvido pelo Professor Jean-Marc Franssen da Universidade de Liège, na Bélgica.

Por último, os ensaios experimentais têm custo bastante elevado, pois exigem grandes fornos e equipamentos tecnológicos de alta precisão. Ainda assim, costumam-se utilizar resultados experimentais para dimensionamento do material de revestimento contra fogo de estruturas de aço. Os ensaios são bastante relevantes no fornecimento de parâmetros de entrada para métodos teóricos e para a sua validação. Estes métodos apresentam resultados tanto mais precisos quanto mais realistas forem os modelos adoptados.

Seguidamente, apresentam-se a justificação para a escolha do tema em questão, os objectivos do trabalho, a metodologia empregue e uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo.

## **1.2. Justificação**

Quando submetidos a elevadas temperaturas, os materiais constituintes dos elementos estruturais vêm as suas propriedades mecânicas reduzidas, facto que poderá conduzir a um colapso prematuro de um dado elemento, ou mesmo de toda a estrutura, podendo desta forma não garantir a total evacuação do edifício. Tal efeito é particularmente gravoso para estruturas de aço, atendendo a grande degradação das propriedades mecânicas deste material quando submetido a altas temperaturas.

Neste contexto, na Engenharia Civil assume grande interesse a análise de edifícios em situação de incêndio, inicialmente desenvolvida através de ensaios experimentais, posteriormente através de modelações numéricas e, mais recentemente com o aparecimento de normas por todo o mundo, recorrendo a métodos simplificados criados de forma a agilizar todo o processo. De entre essas normas há que destacar os Eurocódigos, adoptados na Europa.



Embora a utilização de métodos simplificados seja cada vez mais uma prática corrente, quer pela sua facilidade de utilização quer pelos satisfatórios resultados obtidos, sabe-se também que esses métodos pressupõem algumas simplificações como é o caso da uniformidade da propagação da temperatura no ambiente e da distribuição uniforme da temperatura no perfil. Esta, por sua vez, está intimamente relacionada com um factor, o factor de massividade, definido mais à frente, que tem um enorme peso na determinação da temperatura máxima atingida pelos elementos estruturais.

Sendo assim, é do máximo interesse aferir-se a conformidade desses métodos relativamente à realidade, quer utilizando ensaios experimentais quer, como no caso da presente dissertação, através de modelações numéricas.

### 1.3.Objectivos

O trabalho tem como objectivo principal estudar, com carácter numérico, a evolução da temperatura em secções transversais de elementos estruturais de aço, de forma a poder ser efectuada uma comparação com as equações propostas pelo método simplificado de cálculo, para a determinação da temperatura, prescritas pelo Eurocódigo 3.

É importante destacar que para elementos de aço, a obtenção da evolução da temperatura, obtida por meio das equações prescritas pelo Eurocódigo 3, depende directamente de um parâmetro denominado factor de massividade, o qual é obtido pela relação entre o perímetro exposto ao fogo e a área da secção transversal.

Na Figura 1.2 são apresentadas equações para a determinação do factor de massividade, extraídas do Eurocódigo 3, para algumas secções transversais.

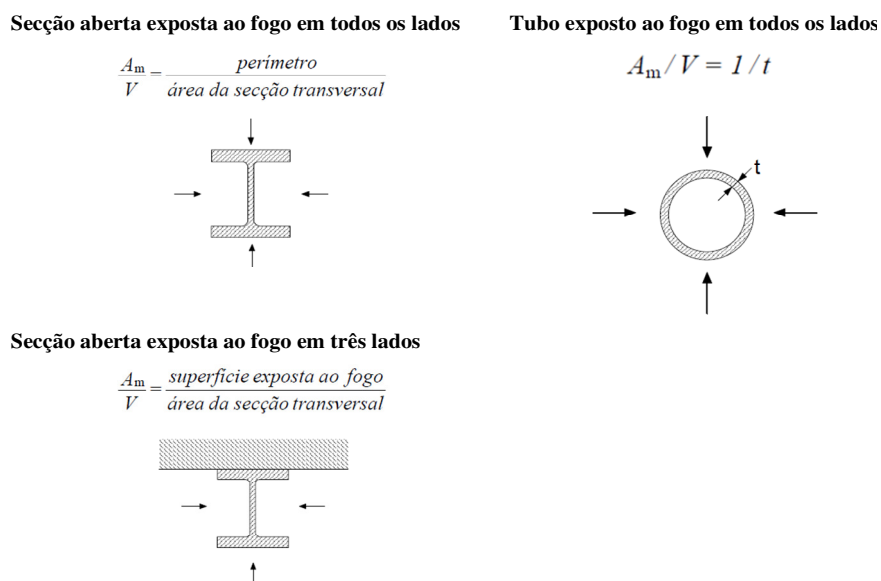


Figura 1.2 - Factores de massividade para elementos de aço não protegidos [Fonte: Eurocódigo 3]

Por fim, são apresentados os resultados de alguns casos de perfis de aço em situação de incêndio, em que se considerou apenas a acção térmica no elemento, utilizando cada um dos métodos.

## **1.4. Metodologia**

A pesquisa inicia-se com o estudo das características térmicas dos materiais de interesse, o aço e alguns materiais de protecção térmica. Para além de serem importantes para a compreensão dos fenómenos envolvidos, essas propriedades são introduzidas no programa de computador SAFIR-2007. É apresentada uma descrição deste programa e da sua metodologia de cálculo, a qual tem por base o Método dos Elementos Finitos.

São realizadas análises térmicas em secções transversais de aço, simulando alguns cenários possíveis de ocorrer na realidade, com e sem protecção específica e com fogo actuando em toda a secção ou em parte da secção. Para isto foram utilizados dois pré-processadores na criação dos ficheiros de input, os programas SAFIRWIZARD e GID 10.0.4, que permitem a rápida criação de um arquivo de entrada 2D para análise térmica.

Foi ainda utilizado o pós-processador DIAMOND - 2009, que permite visualizar os resultados ao longo do tempo em vários pontos da estrutura. Foram assim obtidos diagramas de temperatura em função do tempo para diversas situações.

Outra fase da pesquisa consistiu no estudo do Método Simplificado de Cálculo apresentado no Eurocódigo 3 parte 1.2, para as mesmas situações atrás referidas. Foram ainda obtidas curvas de temperatura em função do tempo, as quais foram comparadas com os resultados fornecidos pelo programa SAFIR-2007.

Por fim foram elaborados alguns ábacos de modo a proporcionar uma consulta rápida em situações de menor complexidade, de modo a agilizar todo o processo.

## **1.5. Apresentação do Trabalho**

Ao longo deste capítulo foi apresentada a proposta do presente trabalho, incluindo justificação, objectivos e metodologia.

O *capítulo 2* apresenta um breve histórico de acidentes envolvendo estruturas metálicas sob a situação de incêndio, assim como referências a alguns dos importantes trabalhos realizados no campo experimental e numérico, sendo ainda citadas as normas em vigor em Portugal e noutros países. O *capítulo 3* aborda os principais conceitos sobre o incêndio, o modelo incêndio real e as tentativas

normativas de o caracterizar por meio de curvas, quer paramétricas quer nominais presentes no Eurocódigo 1.

O **capítulo 4** apresenta os principais mecanismos de transferência de calor, transferência de calor por condução, por convecção e por radiação.

No **capítulo 5** são apresentadas as diversas propriedades térmicas referentes aos materiais de interesse directo para o desenvolvimento do presente trabalho: o aço como elemento estrutural, o betão e o gesso, entre outros como materiais de protecção contra o incêndio.

No **capítulo 6** são apresentados os meios de obtenção da evolução da temperatura em elementos estruturais com ou sem protecção específica, são analisados modelos avançados de cálculo, apresentando aspectos referentes às simulações numéricas utilizadas, tais como a abordagem de um problema de transferência de calor, os tipos de elementos utilizados e as condições de contorno. São ainda utilizados modelos simplificados de cálculo, de acordo com os Eurocódigos em vigor. São também apresentados casos de estudo e de aplicação dos modelos adoptados.

No **capítulo 7** são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2. Incêndio

### 2.1.Introdução

Como referido em DRYSDALE (1998), embora sendo o fogo uma manifestação química que aparece em resposta à existência de uma fonte de calor, comburente e combustível, a maneira como este se propaga depende aspectos tais como: ventilação (portas, janelas, etc.), existência de compartimentos (paredes divisórias, etc.), estado físico e distribuição do combustível. No caso das edificações correntes, os combustíveis mais comuns são sólidos orgânicos (madeiras e derivados, polímeros, etc.), constituídos por matérias cujas moléculas são compostas basicamente por carbono e hidrogénio.

Segundo BUCHANAN (2001), de uma forma simplista, a combustão é uma reacção química exotérmica, envolvendo a oxidação da matéria orgânica e a libertação de vapor de água e dióxido de carbono. O processo de combustão de qualquer material requer a presença de oxigénio para que a oxidação possa ocorrer. Na maioria dos incêndios em edifícios, a intensidade da combustão depende da quantidade de gases inflamáveis que entram em contacto com a atmosfera no seio do incêndio, seja por meio convectivos das chamas seja pelos produtos da combustão.

A combustão requer a presença de uma fonte de calor externa a fim de aumentar a temperatura até ser atingido o ponto de ignição; após este ponto a chama sofre um acréscimo até se tornar estável, momento a partir do qual já não existe necessidade da presença da fonte externa, pois a chama criada já consegue manter a reacção de combustão.

Nos edifícios actuais podem-se encontrar inúmeras fontes de calor, através de chama directa (velas, fósforos, lareiras, etc.), fontes fumegantes (cigarros, fontes eléctricas, etc.) ou através de fontes radiantes (superfícies quentes, fricção, etc.)

Quer a quantidade de calor quer a temperatura requerida para causar a ignição dependem das propriedades térmicas e geométricas do material combustível e do tempo de exposição à fonte de calor. O tempo de exposição para o qual se dá a ignição depende da inércia térmica (que é função da densidade, do calor específico e da capacidade térmica) do material. A inércia térmica, não é mais que a resistência oferecida pelo material à tentativa de alterar o seu estado termodinâmico.

Assim, para uma mesma fonte de calor, o ponto de ignição será mais rapidamente atingido quanto menor for a inércia térmica do material.

Relativamente à ignição, esta divide-se em duas possíveis:

**-ignição-piloto** – ocorre na presença de uma chama ou faísca;

**-auto-ignição** – responsável pela combustão espontânea de gases voláteis de uma fonte de combustível na ausência de chama ou faísca. Para superfícies expostas ao fluxo de calor por radiação, a intensidade requerida para causar auto-ignição é superior a requerida para se obter a ignição-piloto.

Após o ocorrer da ignição, a segurança da estrutura depende da rapidez com que o incêndio alastra pelos materiais combustíveis, que por sua vez depende da localização e tamanho das chamas (aquecimento por radiação), da direcção das correntes de ar (aquecimento por convecção), das propriedades térmicas do combustível e da sua flamabilidade. Existem várias estratégias para a modelação do comportamento de um incêndio real, o modelo do incêndio natural e vários modelos apresentados nas diversas normas mundiais. Nesta dissertação apenas se abordarão os modelos preconizados no Eurocódigo 1, Parte 1.2.

## 2.2.Modelo de Incêndio Real

Para o efeito do estudo da segurança de estruturas, o incêndio pode ser caracterizado por uma curva que fornece a temperatura dos gases em função do tempo, sendo essa curva o ponto de partida para o dimensionamento da estrutura sob a acção térmica.

Em KAEFER (2006) considera-se que um incêndio é composto essencialmente por três fases denominadas: fase inicial ou eclosão (fase que ocorre após a ignição), fase de aquecimento ou plena combustão e fase de arrefecimento. A Figura 2.1 representa as diferentes fases de um incêndio natural.

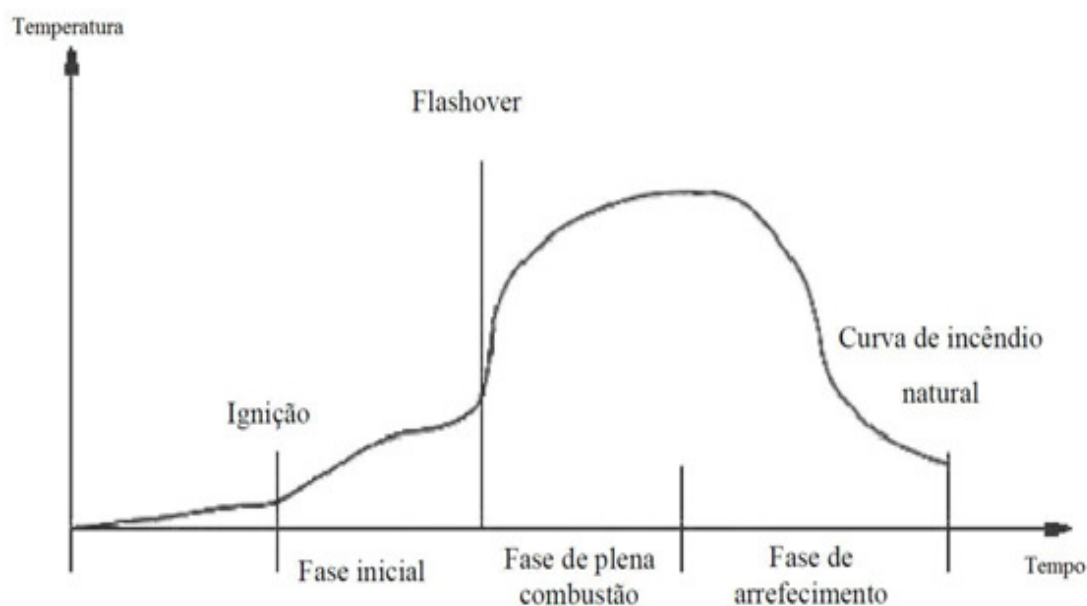


Figura 2.1 - Curva temperatura x tempo de um incêndio real [Fonte: MOURA (2005)]

O início de um incêndio é sempre marcado pela ignição do material contido no local. A ventilação do ambiente, a natureza da fonte de ignição, as propriedades dos materiais envolvidos e o seu desempenho quando expostos a altas temperaturas (flamabilidade, libertação de calor, propagação das chamas, entre outros) interagem na fase inicial do incêndio. Durante esta fase as temperaturas ainda são baixas e o incêndio é considerado de pequenas proporções. O aquecimento acontece de forma relativamente lenta e permanece bem localizado. Após atingirem um nível suficiente de radiação, todos os materiais combustíveis do compartimento entram em ignição rapidamente, configurando desta forma o ponto mais crítico do incêndio, fase chamada de ignição generalizada ou *flashover*, correspondente à transição entre a fase de aquecimento e a fase de queima.

GUERRA (2003) afirma que, durante esta segunda fase, a temperatura eleva-se de forma brusca e o incêndio propaga-se rapidamente. A combustão pode ser controlada pela ventilação através da ausência de ar ou pelas propriedades dos materiais combustíveis existentes no local. Nesta fase, existe uma elevada produção de chamas atingindo-se a temperatura máxima devido, não só à quantidade de oxigénio existente no ar que alimenta a combustão, como também aos vapores quentes que se produzem e se elevam. A queima dos materiais é determinada pela quantidade, porosidade e forma dos mesmos. O combate de um incêndio nesta fase torna-se mais difícil porque a energia libertada é elevada, o que torna geralmente os recursos e esforços de combate insuficientes, recorrendo-se à resistência do edifício ou elemento estrutural para prevenir o alastramento do fogo e o colapso estrutural no período posterior a esta fase.

Também segundo GUERRA (2003), a terceira fase de um incêndio depende do ambiente onde ele ocorre, ao ar livre ou em espaço confinado. No caso de ocorrer ao ar livre, segue-se a fase de declínio das chamas até se verificar a extinção por ausência de combustível. Com a queima do combustível existente, não há fornecimento continuado de energia térmica para o ambiente. Desta forma, a temperatura desce e quebra-se a cadeia de elementos necessários à ocorrência do fogo (calor, combustível e comburente) conhecido como o triângulo do fogo, representado na Figura 2.2.

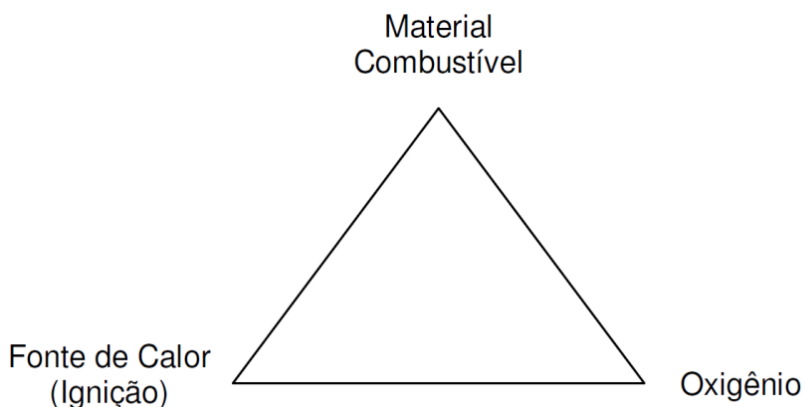


Figura 2.2 - Triângulo do Fogo [Fonte: CLARET (2000)]

Ainda segundo GUERRA (2003), num espaço fechado o fenómeno é mais complexo pois pode haver evolução de três formas distintas:

- Declínio das chamas (como num incêndio no exterior), quando o espaço for ventilado e o calor se puder libertar para o exterior;
- Combustão generalizada, que ocorre se o calor não se puder libertar para o exterior mas existir renovação de ar razoável no local;
- Asfixia, se não existir renovação de ar no local de incêndio, sendo notória a diminuição das chamas apesar da temperatura se manter com valores muito elevados. A quantidade de oxigénio existente é baixa, dando origem ao fenómeno de incandescência; contudo a quantidade de gases libertados na combustão é elevada.

Segundo MOURA (2005), na fase final é crucial garantir a resistência das matérias ao fogo, visto que os elementos e componentes devem continuar a desempenhar a função para a qual foram projectados.

A curva representativa de um incêndio real é de difícil determinação, pois depende de diversos parâmetros como, disposição das aberturas, material combustível e ventilação, que são de grande variabilidade em edifícios. Como resposta a estas dificuldades, os principais órgãos de pesquisa formularam métodos para que a interacção, *temperatura x tempo* possa ser modelada de forma simplificada mas representativa para os casos encontrados na prática.

Destes modelos, serão aqui citados o modelo de incêndio natural e o modelo de curvas nominais adoptado pelo Eurocódigo 1, Parte 1.2.

## 2.3. Modelo de Incêndio Natural

O modelo de incêndio natural, esquematizado na Figura 2.3, corresponde a uma simplificação das condições de incêndio real, ajustando-se na fase de arrefecimento a curva *temperatura x tempo* a uma recta. Desta forma, segundo VILA REAL (2003), neste modelo consideram-se as seguintes fases:

- fase inicial ou ignição – valores de temperatura baixos, não havendo ainda nenhuma influencia sobre o comportamento estrutural. Não sendo considerada para as curvas *temperatura x tempo* regulamentares, esta é contudo a fase mais crítica do ponto de vista da salvaguarda de vidas humanas pois nesta fase ocorre a produção de gases tóxicos;
- fase de propagação – após o *flashover*, fenómeno que ocorre para temperaturas situadas entre os 450°C e 600°C. É caracterizada pela propagação generalizada do incêndio e pela rápida evolução dos valores das temperaturas;

- fase de desenvolvimento pleno – queima do combustível, sendo a temperatura mantida a valores sensivelmente constantes;
- fase de extinção ou arrefecimento – caracterizada pela diminuição progressiva da temperatura, por falta de combustível, por falta de comburente ou por intervenção de sistemas de controlo( sprinklers, bombeiros, outros).

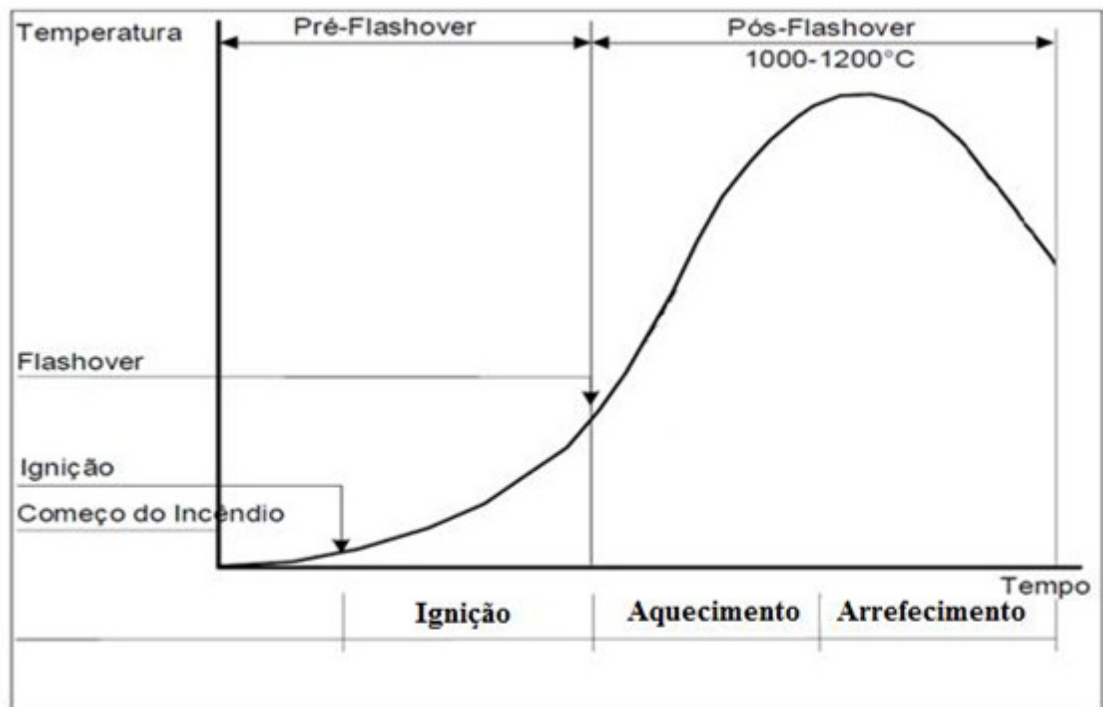


Figura 2.3 - Modelo de um incêndio natural [Fonte: KAEFER (2006)]

Esta representação dos incêndios reais por modelos susceptíveis de serem utilizados no dimensionamento é bastante complexa face à enorme variedade de parâmetros relativos.

Segundo SILVA (2001), Suécia foi o primeiro país a adoptar nas suas normas os conceitos de incêndio natural para a determinação de acções térmicas em edifícios.

O Eurocódigo 1, Parte 1.2 apresenta dois modelos de incêndio natural: o **modelo simplificado** e o **modelo avançado**.

O **modelo simplificado** é baseado em parâmetros físicos específicos com domínios de aplicação limitada. Para incêndios em compartimentos, admite-se uma distribuição de temperatura uniforme, função do tempo. A temperatura dos gases deve ser determinada considerando pelo menos a densidade da carga de incêndio e a condição de ventilação. O comportamento da curva *temperatura x tempo* é determinado por meio de uma curva parametrizada. No caso de incêndios localizados, em que o



*flashover* é pouco provável de acontecer, a distribuição de temperatura é assumida como sendo não-uniforme.

O **modelo avançado** de incêndio natural tem em conta as propriedades dos gases, as transferências de massa e as transferências de energia. Esta implementação deve utilizar um dos seguintes modelos:

- Modelos de uma zona, admitindo uma distribuição de temperatura uniforme no compartimento mas dependente do tempo;
- Modelos de duas zonas, admitindo uma camada superior com uma espessura e temperatura uniforme, ambas dependentes do tempo, e ainda uma camada inferior com uma temperatura menor e uniforme, também dependente do tempo;
- Modelos de cálculo de dinâmica dos fluidos que indiquem a evolução da temperatura no compartimento de forma completamente dependente do tempo e do espaço.

A obtenção de parâmetros necessários para a modelação uma curva *temperatura x tempo* de um incêndio natural é feita através de ensaios, que procuram simular situações reais de incêndio.

## 2.4. Modelos de Incêndio Baseado em Curvas Nominais

As curvas nominais são denominadas desta forma pelo facto de serem estabelecidas por meio de equações simples, assim como por não dependerem das dimensões ou do tipo dos edifícios. É de referir que também não possuem fase de ignição nem de extinção.

As acções térmicas presentes no Eurocódigo 1, Parte 1.2 são definidas pelo fluxo de calor efectivo,  $\dot{h}_{net}$  na fronteira do elemento. Em superfícies expostas ao fogo, este fluxo de calor deverá ser determinado tendo em consideração duas parcelas, correspondentes respectivamente ao fluxo de calor por convecção,  $\dot{h}_{net,c}$  e por radiação,  $\dot{h}_{net,r}$ .

Deste modo o valor de cálculo do fluxo de calor efectivo é obtido através da Equação 2.1 indicada de seguida.

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.1)$$

onde:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.2)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.3)$$

em que:

$\alpha_c$  coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m<sup>2</sup>K];

$\theta_g$  temperatura dos gases no compartimento de incêndio [ °C] ;

$\theta_m$  temperatura do perfil metálico [ °C];

$\Phi$  factor de configuração, que, de acordo com o Eurocódigo 1, Parte 1.2, deve ser tomado igual à unidade;

$\varepsilon_m$  emissividade da superfície do elemento, que de acordo com o Eurocódigo 3, Parte 1.2 deve ser tomando igual a 0,7 para aços carbono e 0,4 para aços inoxidáveis;

$\varepsilon_f$  emissividade do compartimento de incêndio, considerada como  $\varepsilon_f = 1,0$  de acordo com o Eurocódigo 3, Parte 1.2;

$\theta_r$  temperatura de radiação na vizinhança do perfil, podendo tomar-se  $\theta_r = \theta_g$  de acordo com o disposto no Eurocódigo 1, Parte 1.2.

A temperatura dos gases no compartimento,  $\theta_g$ , da qual dependem as densidades de fluxo de calor referidas anteriormente, é estipulada no Eurocódigo 1, Parte 1.2, sendo definidas nos próximos pontos.

#### **2.4.1. Curva de incêndio padrão, ISO 834**

Segundo especificações da ISO 834-1:1999 que serviram de base para a curva de incêndio padrão do Eurocódigo 1, a temperatura dos gases quentes é descrita pela Equação 2.4:

$$\theta_g(t) = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2.4)$$

em que:

$\theta_g$  temperatura dos gases no compartimento de incêndio [ °C];

$t$  tempo [min].

À curva ISO 834 corresponde a Equação 2.4 e, embora afastada da realidade, serve como referência para programas da especialidade e ensaios experimentais em fornalhas em diversos países. Essa curva apresenta, apenas um ramo ascendente, admitindo-se que a temperatura dos gases é sempre crescente com o tempo. Difere do modelo de incêndio natural, pois o incêndio-padrão não depende das características do ambiente ou da carga de incêndio.

### 2.4.2. Curva de incêndio para elementos exteriores

Segundo especificações do Eurocódigo 1, a temperatura dos gases quentes ou curva de incêndio para elementos exteriores é descrita pela Equação 2.5:

$$\theta_g(t) = 20 + 660(1 - 0,687 e^{-0,32t} - 0,313 e^{-3,8t}) \quad (2.5)$$

em que:

$\theta_g$  temperatura dos gases no compartimento de incêndio [ °C];

$t$  tempo [min].

A curva de incêndio para elementos exteriores definida pela Equação 2.5 é menos severa que a curva de incêndio padrão, devendo ser sendo utilizada em situações onde os elementos estruturais se encontram no exterior do edifício, como por exemplo no edifício IADE, situado em Lisboa, Figura 2.4.



Figura 2.4 - Estrutura metálica exterior, IADE, Lisboa

### 2.4.3. Curva de incêndio de hidrocarbonetos

Segundo especificações do Eurocódigo 1, a temperatura dos gases quentes correspondentes a um incêndio de hidrocarbonetos, é descrita pela Equação 2.6:

$$\theta_g(t) = 20 + 1080(1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) \quad (2.6)$$

em que:

$\theta_g$  temperatura dos gases no compartimento de incêndio [ °C];

$t$  tempo [min].

Como exemplo de utilização desta curva, refere-se o projecto de túneis, armazéns industriais e sempre que o principal combustível sejam hidrocarbonetos (petróleo, gás natural, solventes plásticos).

Um incêndio regido por esta curva, foi o que deflagrou em 11 de Setembro de 2001, após o embate de dois aviões nas torres gémeas do World Trade Center em Nova York. O incêndio provocou o colapso estrutural desses edifícios, como as Figura 2.6 e 2.7 mostram.



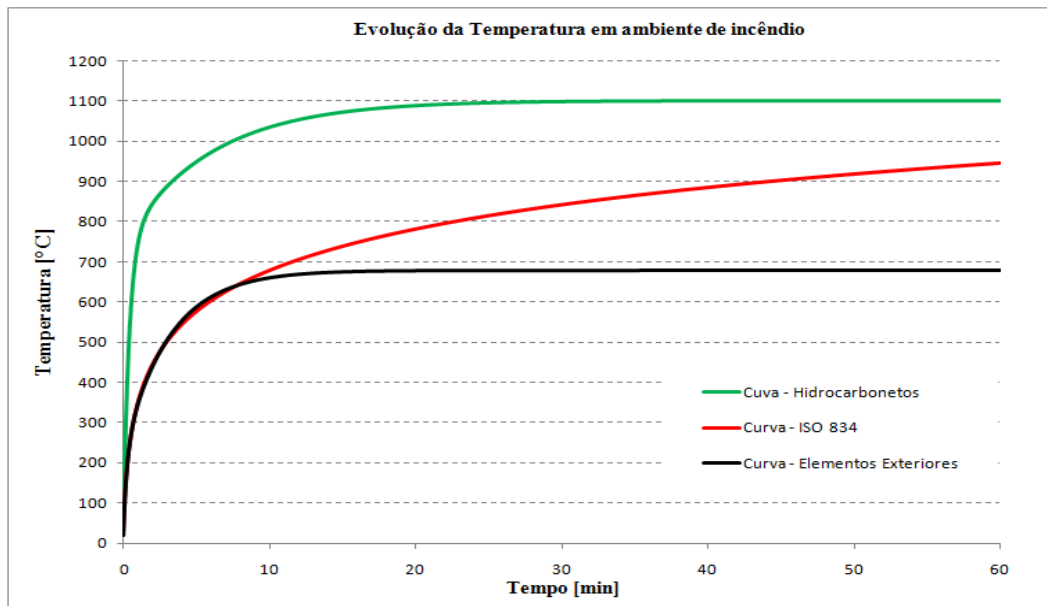
**Figura 2.5 - Incêndio de hidrocarbonetos nas torres World Trade Center [Fonte: LUDLUM (2002)]**



**Figura 2.6 - Colapso das torres World Trade Center [Fonte: LUDLUM (2002)]**

De entre as três curvas nominais consideradas pelo Eurocódigo 1, esta é a mais gravosa.

Na Figura 2.8, são comparadas as curvas obtidas pelos três modelos apresentados anteriormente, sendo de referir que estas não possuem qualquer fase de ignição, arrefecimento ou de extinção.



**Figura 2.7 - Curvas nominais definidas no Eurocódigo 1 [Fonte: Eurocódigo 1]**

A acção térmica na estrutura é descrita pelo fluxo de calor provocado pela diferença de temperatura entre os gases quentes do ambiente e os componentes estruturais. Os próximos capítulos pretendem esclarecer como um incêndio interage com os elementos estruturais. São ainda apresentados conceitos necessários à quantificação da acção térmica e dos seus efeitos sobre as propriedades dos materiais.

### 3. Mecanismos de Transferência de Calor

Segundo WANG (2002), o fenómeno *transferência de calor* ocorre quando dois sistemas, ou um determinado sistema e o meio em que se insere, interagem apresentando temperaturas diferentes.

Em ambiente de incêndio, as temperaturas dos elementos estruturais tendem ao longo do tempo a aproximar-se da temperatura dos gases quentes presentes. De forma a se determinar a evolução nos elementos, é necessário conhecer os mecanismos de transferência de calor envolvidos, **condução**, **convecção** e **radiação**; ou seja, é importante que se conheçam os modos como a energia é gerada e dissipada no ambiente. Estes três mecanismos serão abordados no presente capítulo, onde se aprofundam os conceitos de transferência térmica.

#### 3.1. Transferência de Calor por Condução

Em BUCHANAN (2002), a **condução** é descrita como sendo o processo pelo qual a energia calorífica se transmite, num corpo qualquer, das moléculas com maior energia cinética (maior temperatura) às moléculas com menor energia cinética (menor temperatura), sem que haja transferência de massa. Este processo envolve electrões livres. Desta forma, materiais bons condutores eléctricos terão também uma boa condutividade térmica. Em materiais com baixa condutividade térmica, o calor é conduzido por uma vibração mecânica da cadeia molecular.

A condução é um importante factor na ignição das superfícies assim como na resistência á acção térmica nas estruturas. Para uma análise deste fenómeno é necessário conhecer algumas propriedades dos materiais, nomeadamente a *densidade*,  $\rho$  (massa por unidade de volume), o *calor específico*,  $c$  (calor necessário para elevar uma unidade a temperatura de uma unidade de massa de um determinado material) e a *condutividade térmica*,  $\lambda$  (taxa de calor transferido por unidade de tempo através de uma unidade de espessura).

Outras propriedades igualmente importante são a *difusividade térmica*,  $\alpha$ , dada pela Equação 3.1 e a *absortividade térmica*,  $b$ , dada pela Equação 3.2.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (3.1)$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \quad (3.2)$$

Observa-se que materiais com baixa absortividade térmica expostos a fontes de calor sofrem uma rápida elevação da temperatura da sua superfície, ficando mais propensos a ignição. Ou seja, para uma dada carga de incêndio, ambientes forrados com este tipo de materiais terão temperaturas mais

elevadas no seu interior comparativamente a soluções onde se utilizem materiais com elevada absorptividade térmica.

Segundo LIENHARD V (2005), para condições estacionárias, a transferência de calor por condução é directamente proporcional ao gradiente da temperatura entre dois pontos, ponderado por uma constante de proporcionalidade, a *condutividade térmica*,  $\lambda$ .

A lei fundamental que rege a transmissão de calor foi proposta por FOURIER (1822) e é expressa pela Equação 3.3. Segundo esta lei, a quantidade de calor que atravessa uma área  $A$ , normal à direcção do fluxo de calor, na unidade de tempo, é proporcional ao produto da área pelo gradiente térmico:

$$Q = -\lambda A \frac{d\theta}{dn} \quad (3.3)$$

em que:

$Q$  quantidade de calor que atravessa a área  $A$  segundo a sua normal  $n$  [W];

$\lambda$  condutividade térmica [W/mK];

$A$  área da secção transversal através da qual o calor flui por condução [m<sup>2</sup>];

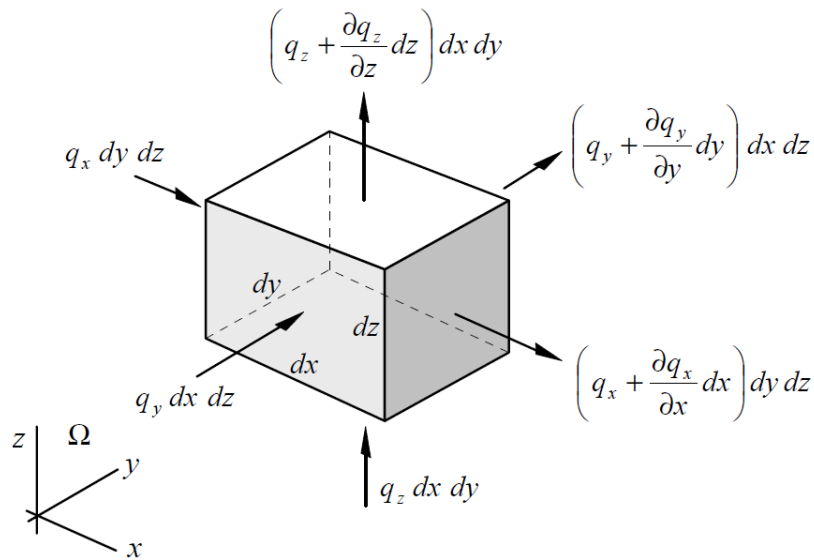
$\frac{d\theta}{dn}$  gradiente de temperatura na secção [K/m].

A condutividade térmica do material depende da sua composição química, estado físico, textura e temperatura. Desta forma, a condutividade térmica pode variar entre valores muito afastados.

O sinal negativo na Equação 3.3 significa que o fluxo de calor ocorre em sentido contrário ao gradiente de temperatura. A quantidade de calor por unidade de área e por unidade de tempo é designada *fluxo por calor*  $q$  [W/m<sup>2</sup>], sendo dada pela Equação 3.4, válida para condições unidimensionais:

$$q = \frac{Q}{A} = -\lambda \frac{d\theta}{dn} \quad (3.4)$$

Para determinação das equações básicas que governam a condução de calor em um sólido, considera-se um elemento tridimensional infinitesimal num domínio  $\Omega$ , conforme indicado na Figura 3.1. Admitem-se também as hipóteses de isotropia, meio contínuo, homogeneidade térmica (propriedades do material independentes do ponto considerado), e ainda que a condutividade térmica e o calor específico são variáveis com a temperatura.



**Figura 3.1 – Fluxo de calor num elemento tridimensional infinitesimal [Fonte: MENDES (2004)]**

Aplicando-se a primeira lei da termodinâmica, Lei de Conservação da Energia, ao elemento infinitesimal tridimensional apresentado na Figura 3.1, obtém-se:

$$\begin{array}{ccccc} \text{Fluxo de calor} & & \text{Fluxo de calor} & & \text{Calor gerado} \\ \text{que entra} & - & \text{que sai} & + & \text{internamente} \end{array} = \begin{array}{c} \text{Variação de energia} \\ \text{interna do elemento} \end{array} \quad (3.5)$$

Se o calor que flui na direcção dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  por unidade de comprimento na unidade de tempo é denominado  $q_x$ ,  $q_y$  e  $q_z$ , respectivamente, a diferença entre o fluxo que sai e o fluxo que entra no elemento é dada por:

$$dxdy \left( q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz - q_z \right) + dxdz \left( q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - q_y \right) + dydz \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx - q_x \right) \quad (3.6)$$

O calor gerado no elemento na unidade de tempo pode ser expresso por:

$$Q \, dx \, dy \, dz \quad (3.7)$$

A variação da energia interna na unidade de tempo pode ser expressa por:

$$\rho c \frac{d\theta}{dt} dx \, dy \, dz \quad (3.8)$$

onde:

$Q$  calor gerado internamente no interior do elemento por unidade de volume e por unidade de tempo;

$c$  calor específico do material;

$\rho$  densidade do material;



$\theta(x, y, z, t)$  distribuição de temperatura.

Substituindo os termos desenvolvidos na Equação da conservação de energia obtêm-se:

$$dx dy dz \left( \frac{\partial q_{k,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{k,y}}{\partial y} + \frac{\partial q_{k,z}}{\partial z} \right) = dx dy dz \left( Q - \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) \quad (3.9)$$

Dividindo ambos os termos por  $dx dy dz$ , tem-se:

$$\frac{\partial q_{k,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{k,y}}{\partial y} + \frac{\partial q_{k,z}}{\partial z} - Q + \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (3.10)$$

Aplicando a Lei de Fourier (3.4) à Equação 3.10, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Q - \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (3.11)$$

À Equação 3.11 dá-se o nome de *equação diferencial da condução de calor*.

Segundo as hipóteses da homogeneidade térmica e isotrópica, a condutividade térmica  $\lambda$ , é constante em qualquer ponto do material e em qualquer direcção. Aplicando essa hipótese à Equação 3.11, obtém-se:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{Q}{\lambda} - \frac{\rho c}{\lambda} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad \text{ou} \quad \nabla^2 \theta + \frac{Q}{\lambda} - \frac{\rho c}{\lambda} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (3.12)$$

Sendo  $\nabla^2$  o operador diferencial, e  $\frac{\lambda}{\rho c}$  a difusividade térmica. No caso em  $Q = 0$ , ou seja, não existe produção interna de calor, obtém-se a equação de *Fourier*, Equação 3.13:

$$\nabla^2 \theta - \frac{\rho c}{\lambda} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (3.13)$$

Para regime permanente, ou seja  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ , obtém-se a equação de *Poisson*, Equação 3.14:

$$\nabla^2 \theta + \frac{Q}{\lambda} = 0 \quad (3.14)$$

E, em regime permanente sem produção interna de calor, obtém-se a Equação 3.15, *equação de Laplace*:

$$\nabla^2 \theta = 0 \quad (3.15)$$

Com o intuito de solucionar a Equação diferencial 3.11, as condições iniciais, no tempo  $t = t_0$  e no domínio  $\Omega$ , devem ser especificadas como se mostra na Equação 3.16,

$$\theta(x, y, z, 0) = \theta_0(x, y, z, 0) \quad \text{em} \quad \Omega \quad (3.16)$$

Quanto às condições de contorno na superfície  $\Gamma$ , estas podem ser divididas em condições de contorno essenciais ou de *Dirichlet*, correspondendo a temperaturas prescritas numa dada parte do contorno (Equação 3.17) :

$$\theta = \theta(x, y, z, t) \quad \text{em} \quad \Gamma_\theta \quad (3.17)$$

Ou condições de contorno naturais ou de *Neumann*, correspondendo a fluxos de calor numa parte do contorno, orientados na direcção normal  $n$  ao contorno (Equação 3.18):

$$q_k = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} \quad \text{em} \quad \Gamma_q \quad (3.18)$$

### 3.2. Transferência de Calor por Convecção

De acordo com LIENHARD V (2005), no mecanismo de **convecção** a transferência de calor ocorre na fronteira formada entre duas superfícies de estados físicos diferentes. Esta transferência ocorre devido ao movimento dos fluidos, sejam eles gases ou líquidos, sendo um importante factor na propagação das chamas num incêndio, assim como no transporte dos gases quentes.

As correntes num fluido estão sempre associadas a diferenças de pressão. Quando as correntes de convecção são devidas unicamente à diferença de densidade do fluido provocada por gradientes térmicos, a convecção é dita *natural*. Se as diferenças de pressão forem motivadas por causas externas como ventiladores, bombas, explosões ou reacções de queima, a convecção é dita *forçada*.

Na análise térmica de uma estrutura em situação de incêndio, a convecção ocorre entre um fluido e a superfície de um sólido. Neste caso, as velocidades que se desenvolvem no fluido como consequência das correntes de convecção não necessitam ser determinadas, sendo o processo de transferência de calor por convecção utilizado apenas como um tipo de condição de contorno para o domínio do sólido.

Isaac Newton em 1701, observando o fenómeno da convecção, sugeriu que o arrefecimento de um corpo como o ilustrado na Figura 3.2 fosse descrito pela Equação 3.19:

$$\frac{dT_{corpo}}{dt} \approx T_{corpo} - T_{\infty} \quad (3.19)$$

em que:

$T_{corpo}$  temperatura do corpo [K ou °C];

$T_{\infty}$  temperatura do fluido em movimento [K ou °C].

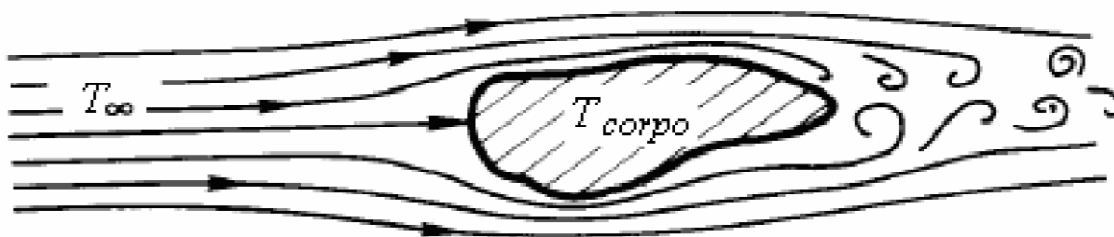


Figura 3.2 – Arrefecimento convectivo de um corpo aquecido [Fonte: MENDES (2004)]

A Equação 3.19 sugere que o calor está a ser transferido do corpo aquecido para o fluido. Se for assumida a hipótese de a que temperatura do corpo é mantida constante,  $\frac{dT_{corpo}}{dt}$  pode ser interpretado como taxa de transferência de calor ( $Q$ ) entre o corpo e o fluido. A Equação 3.19 pode assim ser rescrita, resultando na Equação 3.20, denominada *Lei de arrefecimento de Newton*.

$$Q_c = \alpha_c A (T_{corpo} - T_{\infty}) = \alpha_c A \Delta\theta \quad (3.20)$$

onde:

$Q_c$  quantidade de calor que atravessa a área A [W];

$\alpha_c$  coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m<sup>2</sup>K];

A área de interface sólido-fluido, medida perpendicularmente à direcção do fluxo [m<sup>2</sup>];

$\Delta\theta$  diferença de temperatura entre a superfície sólida e o fluido [K ou °C].

O fluxo de calor devido à convecção é dado por:

$$q = \frac{Q_c}{A} = \alpha_c \Delta\theta \quad (3.21)$$

O valor de  $\alpha_c$  está dependente de vários factores, como a geometria e rugosidade da superfície, além da natureza do fluido. Assim para este parâmetro normalmente toma-se um valor médio que, no caso específico do aço de acordo com o Eurocódigo 3, Parte 1.2 é  $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

### 3.3. Transfêrencia de Calor por Radiação

A transferência de calor por **radiação** baseando-se no facto de todos os corpos emitirem constantemente energia por meio de ondas electromagnéticas. Contrariamente à convecção e à condução, a radiação não necessita da presença de um meio material para que possa ocorrer.

Segundo VILA REAL (1988), a transmissão de calor por radiação tem a sua eficiência máxima no vácuo. A radiação é o principal mecanismo nos processos de transferência de calor que ocorrem a elevadas temperaturas, inclusive para situações de vácuo.

Simplificadamente, o mecanismo da radiação consiste na emissão de ondas electromagnéticas por um corpo aquecido, que, ao serem absorvidas por um receptor, transformam-se em energia térmica. O fluxo máximo de calor que pode ser emitido de uma superfície por radiação é dado pela Equação 3.22, chamada de lei de Stefan-Boltzmann (ver Equação 3.22):

$$q = \sigma \theta^4 \quad (3.22)$$

em que:

$q$  fluxo de calor emitido pela superfície aquecida [W/m<sup>2</sup>];

$\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann,  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ [W/(m}^2\text{K}^4)]$  ;

$\theta$  temperatura absoluta [K];

A Equação 3.22 é válida para os chamados corpos negros. Os corpos reais não preenchem os requisitos de um irradiador perfeito, sendo o fluxo de calor emitido uma fracção dos corpos negros, e descrito pela equação 3.23:

$$q = \varepsilon \sigma \theta^4 \quad (3.23)$$

em que,

$\varepsilon$  emissividade da superfície ( $0 < \varepsilon < 1$ ).

A emissividade de uma superfície depende do comprimento de onda da energia radiante, da temperatura da superfície e do ângulo de radiação. No entanto por uma questão de simplificação, para estes corpos, também denominados de corpos cinzentos, pode-se admitir que a emissividade é independente destes factores.

No caso de um fluido gasoso envolvendo um corpo sólido, o fluido emite calor por radiação  $q_{inc}$  para a superfície do sólido, que o absorve dependendo de sua *absortividade*  $\eta$ , numa quantidade igual a  $\eta q_{inc}$ . Fazendo-se a troca líquida de calor entre a superfície e a vizinhança tem-se que o fluxo líquido de calor emitido por radiação  $q$  é igual à quantidade emitida menos a quantidade absorvida, como mostra a Equação 3.24:

$$q = \varepsilon \sigma \theta_s^4 - \eta q_{inc} \quad (3.24)$$

ou ainda:

$$q = \varepsilon \sigma \theta_s^4 - \eta \sigma \theta_f^4 \quad (3.25)$$

Para corpos cinzentos, aqueles que não absorvem integralmente a energia radiante incidente,  $\varepsilon = \eta$ ; então o calor trocado toma a seguinte expressão:

$$q = \varepsilon_{res} \sigma (\theta_s^4 - \theta_f^4) \quad (3.26)$$

sendo

$q$  quantidade líquida de calor por radiação [ $\text{W/m}^2$ ];

$\varepsilon_{res}$  emissividade resultante da superfície;

$\theta_s$  temperatura absoluta da superfície [K];

$\theta_f$  temperatura absoluta do fluido [K].

## 4. Propriedades dos Materiais de Interesse

A evolução da temperatura em elementos estruturais metálicos (ou mesmo em elementos estruturais de outros tipos de materiais) no decorrer de uma situação de incêndio implica a necessidade de se conhecerem as propriedades térmicas desses materiais.

Quando existe a possibilidade de ocorrerem danos substanciais decorrentes do aumento excessivo de temperatura num elemento estrutural, uma das soluções mais frequentes é envolvê-lo com um material de protecção. A maior ou menor eficiência desse revestimento protector está directamente relacionada com as suas propriedades térmicas como, por exemplo, a condutividade.

Dentro deste contexto, o presente capítulo debruça-se sobre as propriedades térmicas dos aços estruturais, bem como dos materiais de protecção contra incêndio frequentemente utilizados em estruturas correntes da engenharia civil, tendo em vista que no decorrer deste trabalho serão apresentados modelos numéricos que consideram a existência de materiais de protecção.

### 4.1. Propriedades Térmicas dos Aços Estruturais

Segundo o Eurocódigo 3, Parte 1.2, as propriedades térmicas apresentadas nas próximas subsecções aplicam-se aos aços de uso estrutural quando sujeitos a temperaturas elevadas.

O Eurocódigo 3, Parte 1.2, prescreve ainda que, caso algum aço estrutural possua propriedades diferentes das indicadas na norma, ou fique com propriedades diferentes em virtude de operações realizadas para formação ou revestimento de perfis ou para montagem da estrutura, deverão ser utilizados os valores reais dessas propriedades.

#### 4.1.1. Extensão térmica

A extensão térmica do aço  $\Delta l/l$  em função da temperatura, deverá ser determinada de acordo com o Eurocódigo 3, Parte 1.2 através da seguinte Equação 4.1, posteriormente ilustrada na Figura 4.1.

$$\begin{aligned}\frac{\Delta l}{l} &= 1,2 \cdot 10^{-5} \theta_a + 0,4 \cdot 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \cdot 10^{-4} & 20^\circ C \leq \theta_a < 750^\circ C \\ \frac{\Delta l}{l} &= 1,1 \cdot 10^{-2} & \text{para } 750^\circ C \leq \theta_a \leq 860^\circ C \\ \frac{\Delta l}{l} &= 2 \cdot 10^{-5} \theta_a - 6,2 \cdot 10^{-3} & 860^\circ < \theta_a \leq 1200^\circ C\end{aligned}\quad (4.1)$$

em que:

$l$  comprimento a 20 °C;

$\Delta l$  alongamento induzido pela temperatura;

$\theta_a$  temperatura do aço [ $^{\circ}\text{C}$ ].

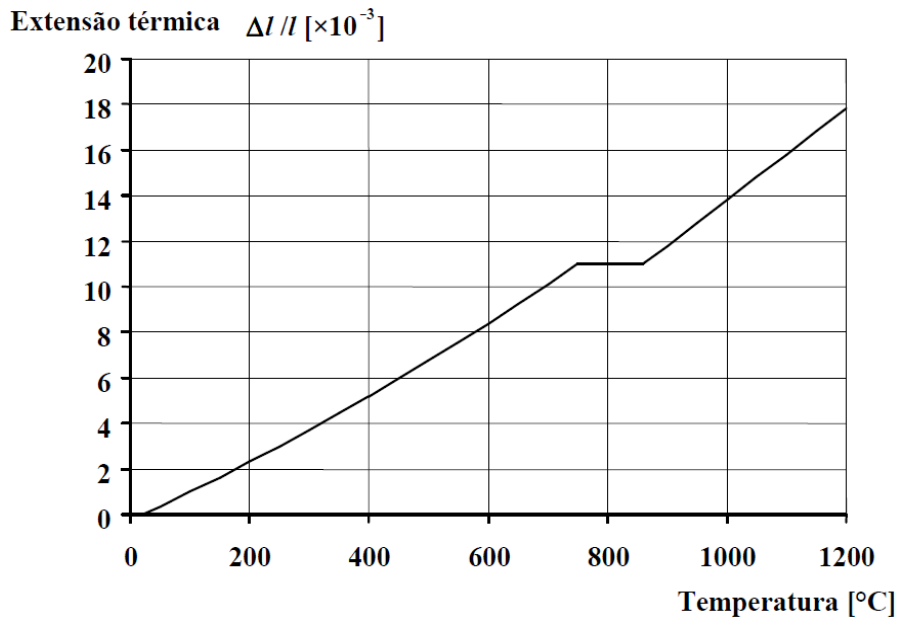


Figura 4.1 – Extensão térmica do aço carbono em função da temperatura [Fonte: Eurocódigo 3]

Como referido em VILA REAL (2003), na versão de 1995 da Parte 1.2 do Eurocódigo 3, para modelos de cálculo simplificados, a relação entre a extensão térmica e a temperatura do aço poderia ser considerada constante, como demonstrado através da Equação 4.2, não sendo contudo essa relação referida na versão actual do Eurocódigo 3.

$$\frac{\Delta l}{l} = 14 \cdot 10^{-6} (\theta_a - 20) \quad (4.2)$$

#### 4.1.2. Calor específico

O calor específico do aço,  $c_a$ , em J/KgK, deverá ser determinado conforme a Equação 4.3, representada graficamente na Figura 4.2.

$$\begin{aligned} c_a &= 425 + 0,773\theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6}\theta_a^3 & 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600^{\circ}\text{C} \\ c_a &= 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} & 600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 735^{\circ}\text{C} \\ c_a &= 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} & 735^{\circ} < \theta_a \leq 900^{\circ}\text{C} \\ c_a &= 650 & 900^{\circ} < \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (4.3)$$

em que:

$\theta_a$  temperatura do aço [°C].

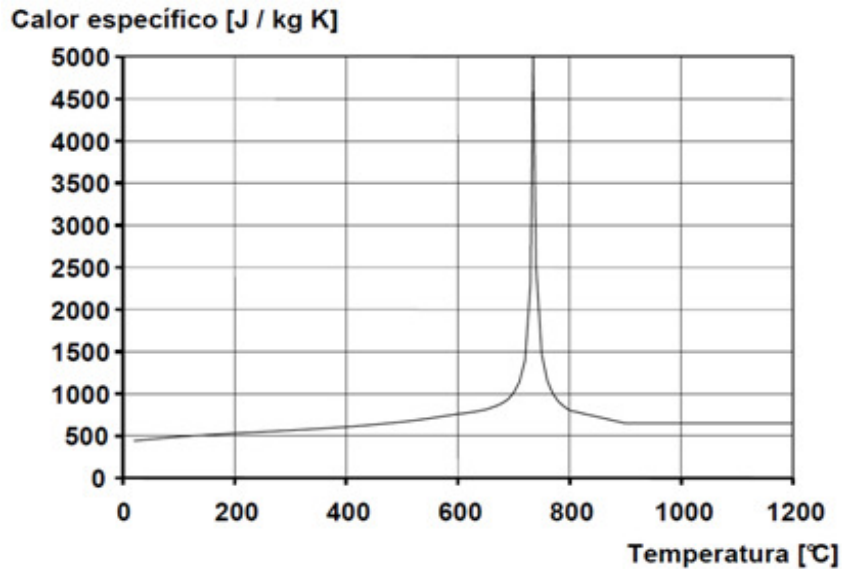


Figura 4.2 – Calor específico do aço carbono em função da temperatura [Fonte: Eurocódigo 3]

Em VILA REAL (2003), é referido que na versão de 1995 da Parte 1.2 do Eurocódigo 3, para modelos de cálculo simplificados, o calor específico poderia ser considerado independente da temperatura do aço (Equação 4.4), o que contudo não é referido na versão actual do Eurocódigo 3.

$$c_a = 600 \text{ [J/KgK]} \quad (4.4)$$

#### 4.1.3. Condutividade térmica

De acordo com o EC3 -1.2, a condutividade térmica,  $\lambda_a$ , em W/mK, varia com a temperatura segundo a Equação 4.5 ilustrada na Figura 4.3.

$$\begin{aligned} \lambda_a &= 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta_a & \text{para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C} \\ \lambda_a &= 27,3 & 800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (4.5)$$

em que:

$\theta_a$  temperatura do aço [°C].



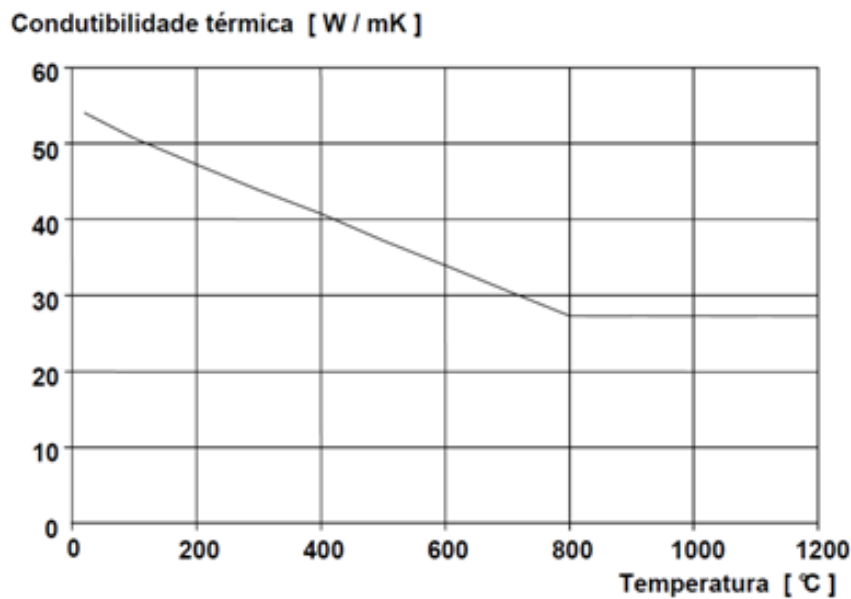


Figura 4.3 – Gráfico da condutibilidade térmica do aço carbono em função da temperatura [Fonte: Eurocódigo 3]

Referindo VILA REAL (2003), na versão de 1995 do Eurocódigo 3, Parte 1.2, para modelos de cálculo simplificados, a condutividade térmica poderia ser considerada independente da temperatura (Equação 4.6), tendo o valor, não sendo contudo esta possibilidade contemplada na versão actual do Eurocódigo 3.

$$\lambda_a = 45 \text{ [W/mK]} \quad (4.6)$$

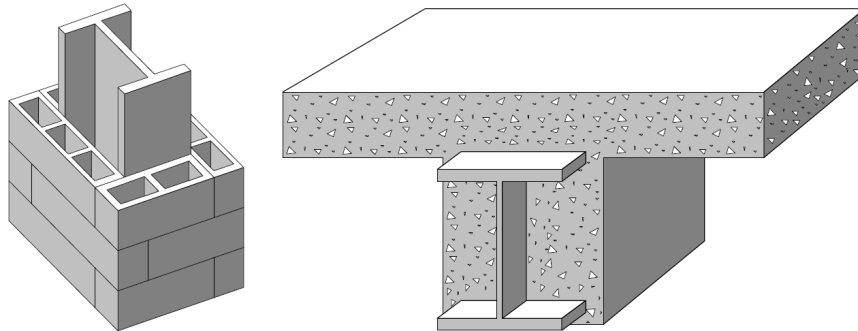
## 4.2. Materiais de Protecção Contra o Fogo

Conforme mencionado anteriormente, as propriedades mecânicas do aço sofrem reduções com o aumento de temperatura, podendo ocasionar o colapso prematuro de um elemento estrutural ou das suas ligações. Segundo VILA REAL (2003) raramente a resistência ao fogo de estruturas metálicas não protegidas é superior a meia hora, o que pode em situações limite causar a perda de vidas humanas.

Para evitar o colapso em situação de incêndio, faz-se o dimensionamento da estrutura para resistir a temperaturas elevadas ou, como procedimento alternativo, faz-se uso de materiais que, ao envolverem os elementos constituintes das estruturas de interesse, actuam como protecção contra o fogo.

A utilização de materiais de protecção térmica permite a obtenção de resistências ao fogo com um largo espectro de valores, indo dos trinta minutos até quatro horas, dependendo da natureza e da espessura do material de protecção utilizado. Segundo FAKURI (1999) inicialmente eram utilizados

materiais já usados na construção com técnicas simples, como a execução de alvenarias contornando pilares ou o envolvimento de vigas e pilares em betão como se mostra na Figura 4.4.



**Figura 4.4 - Protecções clássicas das estruturas de aço [Fonte: RIBEIRO (2004)]**

Em VILA REAL (2003), é listada uma variada gama de materiais e sistemas de protecção térmica, podendo-se distinguir os principais grupos:

- protecção envolvendo o elemento: pintura intumescente, materiais projectados, envolvidos por betão ou protecção em caixão;
- protecção com resguardo;
- irrigação do aço.

Em termos gerais, segundo MENDES (2004), VARGAS (2003) e SILVA (2003), estes materiais devem apresentar:

- baixa massa específica aparente;
- baixa condutividade térmica;
- alto calor específico;
- adequada resistência mecânica (quando expostos ao impacto);
- garantia de integridade durante a evolução do incêndio;
- custo compatível com a natureza e importância da obra.

Muitos fabricantes não apresentam de modo satisfatório nos seus catálogos as propriedades mecânicas e térmicas dos seus materiais. Como referência, apresentam-se na Tabela 4.1 as propriedades de alguns dos materiais mais comuns utilizados como protecção contra o fogo, sendo alguns destes materiais alvo de um comentário mais extensivo no decorrer do capítulo.

Evolução da Temperatura em Elementos de Aço Sujeitos ao Fogo  
Propriedades dos Materiais de Interesse

Tabela 4.1 – Valores das propriedades térmicas para diferentes materiais de protecção [Fonte: VILA REAL (2003)]

Material	Densidade $\rho_p$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Teor de humidade $p$ %	Condutividade térmica $\lambda_p$ [W/mK]	Calor específico $c_p$ [J/KgK]
<b>Materiais de projecção</b>				
- fibra mineral	300	1	0.12	1200
- cimento de vermiculite	350	15	0.12	1200
- perlite	350	15	0.12	1200
<b>Materiais de projecção de alta densidade</b>				
- vermiculite/perlite e cimento	550	15	0.12	1100
- vermiculite/perlite e gesso	650	15	0.12	1100
<b>Placas</b>				
- vermiculite/perlite e cimento	800	15	0.20	1200
- silicato fibroso ou silicato de cálcio fibroso	600	3	0.15	1200
- fibrocimento	800	5	0.15	1200
- placas de gesso	800	20	0.20	1700
<b>Placas de fibras compactas</b>				
- silicato fibroso, lã mineral, lã de rocha	150	2	0.20	1200
<b>Materiais cerâmicos</b>				
- betão	2300	4	1.60	1000
- betão leve	1600	5	0.80	840
- blocos de betão	2200	8	1.00	1200
- tijolo cerâmico vazado	1000	-	0.40	1200
- tijolo cerâmico não vazado	2000	-	1.20	1200

De seguida, apresentam-se alguns dos materiais mais utilizados para protecção de estruturas metálicas contra o fogo.

#### 4.2.1. Betão

Quer o betão normal quer o betão leve têm sido utilizados como material de protecção térmica, envolvendo totalmente perfis de aço como mostrado na Figura 4.5, ou, no caso de perfis tubulares, enchendo o seu interior.

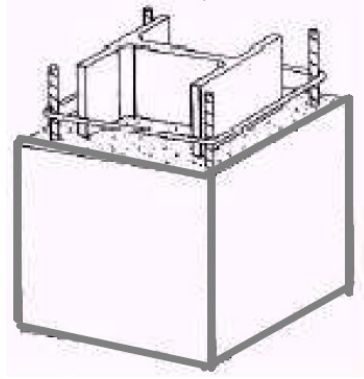


Figura 4.5 – Utilização do betão como material de protecção térmica [Fonte: MENDES (2004)]

O betão é um material com reduzida difusividade térmica, retardando assim o aquecimento dos elementos a proteger. Acresce a esta característica a sua boa durabilidade em ambientes agressivos, pelo que constitui um bom material de protecção. Como desvantagem, há que referir os elevados custos de aplicação comparativamente com processos alternativos existentes no mercado actualmente.

#### 4.2.2. Gesso

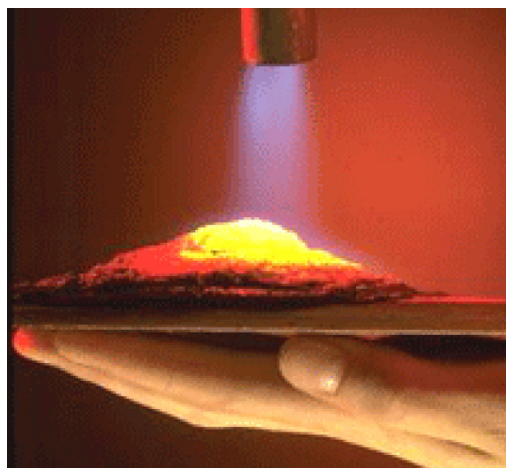
O gesso, sendo um sulfato de cálcio, contem cerca de 20% de água cristalizada no seu estado seco. Quando sujeito a altas temperaturas, sofre uma transformação, transformando-se em sulfato de cálcio anidro e absorvendo neste processo grandes quantidades de calor. Neste processo, há que contar ainda com a absorção de calor pela água no seu processo de vaporização, tornando assim o gesso num bom material de protecção térmica, ainda que necessite de um suporte adequado a fim de evitar a sua degradação. Tal suporte pode ter a forma de uma rede metálica ou em fibra de vidro. A Figura 4.6 mostra a utilização de placas de gesso como material de protecção contra o incêndio.



**Figura 4.6– Utilização de gesso como material de protecção térmica (isolamento da caixa de elevadores) [Fonte: MENDES (2004)]**

#### **4.2.3. Tintas intumescentes**

As pinturas intumescentes contêm derivados celulósicos que, com a adição de ligantes orgânicos especiais e agentes dilatadores, tendem a aumentar o seu volume assim que se atingem temperaturas entre os 100°C e os 300°C. Forma-se assim uma camada protectora que pode atingir 20 a 30 vezes a espessura da camada de tinta inicial, protegendo termicamente a estrutura. Esta protecção pode retardar até cerca de duas horas o aparecimento da temperatura crítica. Na Figura 4.7 exemplifica-se este fenómeno.



**Figura 4.7 – Tinta intumescente expandindo sob acção térmica [Fonte: MENDES (2004)]**

Estas tintas permitem excelentes acabamentos quando se pretende deixar os elementos metálicos à vista.

#### 4.2.4. Vermiculite e perlite

Segundo SILVA (2001), a vermiculite pertence à família das micas, sendo uma rocha mineral que se apresenta sob a forma de lâminas finas separadas por partículas microscópicas de água, apresentando um aspecto esfoliado. A constituição mineral micácea e o seu ponto de fusão em torno de 1370°C tornam este material excelente para a fabricação de painéis protectores, que não libertam fumos nem gases tóxicos quando sujeitos às altas temperaturas, mas apenas vapor de água.

A vermiculite expandida utiliza-se como agregado, originando diversos materiais de protecção térmica em função da associação escolhida. Quando ligada ao cimento ou ao gesso permite produzir argamassas leves com elevado desempenho. A sua densidade varia de 100 a 130 kg/m<sup>3</sup> e a sua aplicação deve ocorrer durante a fase de montagem das estruturas, pois requer limpeza após a aplicação. Depois de aplicada, apresenta acabamento rústico e pode receber uma pintura a base de epóxi, uma vez decorrido o tempo de secagem. A Figura 4.8 mostra o aspecto da vermiculite em diferentes utilizações.



(a)



(b)

**Figura 4.8 - Vermiculite em diferentes utilizações: (a) Vermiculite na forma de flocos [Fonte: MENDES (2004)]; (b) Argamassa à base de vermiculite [Fonte: DIAS (2002)]**

A perlite, semelhante à vermiculite, é um agregado mineral que possui também a faculdade de se expandir sob a acção térmica. A sua aplicação é em tudo idêntica à da vermiculite.

#### 4.2.5. Fibras minerais

As fibras minerais são compostas por lã de rocha e materiais aglomerantes, estes últimos em menor quantidade. São de baixa densidade, em torno de 250 a 300 kg/m<sup>3</sup>, e indicadas para usos interiores e exteriores, podendo permanecer expostas ou não.

Podem ser aplicadas directamente sobre o elemento estrutural, pois apresentam elevada aderência. Não necessitam de revestimento e não apresentam erosão sob corrente de ar. Permitem uma aplicação rápida, devendo esta ser realizada preferencialmente durante a fase de construção mas podendo também ser aplicada durante reabilitações. O material constituinte não necessita de mistura prévia e seca rapidamente.

A Figura 4.9 ilustra uma das técnicas utilizadas na aplicação deste produto assim como o seu aspecto posterior à aplicação.



**Figura 4.9 – Aplicação de fibras projectadas e seu aspecto final [Fonte: DIAS (2002)]**

#### **4.2.6.Argila expandida ou betão leve**

Este material encontra-se na forma de grãos aproximadamente esféricos, leves e inertes, sendo a sua estrutura interna vitrificada e possuindo ainda uma casca externa resistente, o que lhe confere uma boa resistência á compressão.

Contrariamente ao betão normal, este material possui uma massa volúmica com valores muito baixos que normalmente se situam na ordem dos  $350 \text{ Kg/m}^3$ . Sendo um fraco condutor térmico, pode resistir a temperaturas da ordem dos  $1100^\circ\text{C}$ .

A argila expandida possui vários métodos de aplicação, nomeadamente:

- colocação a granel em torno do elemento a proteger;
- como agregado de betão leve;
- em blocos pré-fabricados.

## 5. Evolução da Temperatura no Aço

Neste capítulo são apresentados conceitos e procedimentos referentes à obtenção da evolução da temperatura nos perfis estruturais, com ou sem protecção específica. Os modelos que permitem obter a evolução da temperatura dividem-se, basicamente, em duas categorias:

- **Modelos avançados de cálculo:** têm como base métodos numéricos como, por exemplo, diferenças finitas e elementos finitos. Permitem obter o campo de temperaturas no elemento ao longo do processo de aquecimento. A utilização destes métodos exige o recurso a computadores, em face da complexidade numérica inerente à resolução do problema;
- **Modelos simplificados de cálculo:** permitem obter o aumento de temperatura de modo homogéneo para toda a secção transversal e ao longo do comprimento do elemento de interesse, por meio de simples equações analíticas preconizadas nos Eurocódigos;

Relativamente aos métodos avançados de cálculo, apresenta-se a equação de condução de calor e as suas condições de fronteira e faz-se uma breve abordagem relativamente à sua discretização por elementos finitos de forma a ser resolvida numericamente.

Respeitante aos métodos simplificados, apresentam-se as equações descritas na parte 1.2 do Eurocódigo 3 para determinação da evolução da temperatura em perfis, com e sem protecção contra incêndio.

### 5.1. Métodos Avançados de Cálculo

Os modelos avançados de cálculo utilizam geralmente métodos numéricos como o método das diferenças finitas, ou método dos elementos finito. Estes métodos permitem obter o campo de temperaturas no elemento ao longo do processo de aquecimento. Porém, para a utilização desses métodos, torna-se necessário dispor de programas adequados e de computadores com configurações compatíveis com o esforço numérico necessário.

Existem numerosas referências bibliográficas relativas à análise numérica de transferência de calor, como por exemplo, BATHE (1996). Também foram desenvolvidos vários códigos de cálculo para análise de transferência de calor, sendo que entre os muitos programas disponíveis, podem ser citados o ADAPTIC, o SUPERTEMPCALC (TCD), o VULCAN e o SAFIR - 2007, este último utilizado na presente dissertação.



O principal problema com que se deparam estes métodos é o de como lidar com a condição de contorno de radiação quando se necessita calcular o coeficiente de transferência de calor devido à radiação,  $\alpha_r$ .

Como descrito em WANG (2002), todos estes programas geralmente apresentam resultados muito semelhantes. Deste modo a disponibilidade (custo, suporte técnico) e a interação usuário/programa podem ser os principais factores de decisão na aquisição de um destes programas para utilização em aplicações termo-estruturais.

Nas próximas secções são discutidos aspectos de modelação utilizando o programa SAFIR-2007, adoptado neste trabalho. Será apresentada a forma como esse código analisa o problema de transferência de calor pelo método dos elementos finitos.

### 5.1.1. Equação de condução de calor e condições de fronteira

A transferência de calor no aço é atingida por condução, fenómeno este que, para domínios bidimensionais, se rege pela Equação 5.1, apresentada de seguida.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_a \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_a \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \dot{Q} = \rho_a \cdot c_a \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (5.1)$$

onde,

$\lambda_a$  condutibilidade térmica [W/mK];

$\dot{Q}$  calor gerado internamente por unidade de volume e de tempo [W];

$\rho_a$  massa específica do aço [Kg/m<sup>3</sup>];

$c_a$  calor específico do aço [J/KgK];

$\theta$  temperatura [K];

$t$  tempo [s].

O campo de temperaturas associado à Equação 5.1 deverá satisfazer certas condições de fronteiras, podendo estas ser:

- temperaturas  $\bar{\theta}$  em determinadas posições  $\Gamma_\theta$  da fronteira; fluxo de calor  $\bar{q}$  em determinadas posições  $\Gamma_q$  da fronteira; transmissão de calor por convecção entre uma fronteira  $\Gamma_c$  à temperatura  $\theta$  e o ambiente à temperatura  $\theta_\infty$ , traduzida pela Equação (5.2).

$$q_c = \alpha_c (\theta - \theta_\infty) \quad (5.2)$$

onde,

$\alpha_c$  coeficiente de transmissão de calor por convecção [W/m<sup>2</sup>K];

$q_c$  fluxo de calor por convecção por unidade de área [W/mK];

$\theta$  temperatura da fronteira [K];

$\theta_\infty$  temperatura ambiente [K].

- transmissão de calor por radiação entre uma fronteira  $\Gamma_r$  à temperatura  $\theta$  e o ambiente à temperatura  $\theta_r$

$$q_r = \sigma \varepsilon (\theta^4 - \theta_r^4) \quad (5.3)$$

sendo que,

$q_r$  fluxo de calor por radiação por unidade de área [W/mK];

$\theta_r$  temperatura da superfície absorvente [K];

$\theta$  temperatura da fronteira [K];

$\sigma$  constante de Stefan-Boltzman ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ ) [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>];

$\varepsilon$  emissividade.

A Equação 5.3 pode ser simplificada utilizando o conceito de coeficiente de transmissão de calor por radiação,  $\alpha_r$  [W/m<sup>2</sup>K],

$$\alpha_r = \sigma \varepsilon (\theta^2 - \theta_\infty^2) (\theta - \theta_r) \quad (5.4)$$

tomando a Equação 5.3 a seguinte forma,

$$q_r = \alpha_r (\theta - \theta_\infty) \quad (5.5)$$

No caso da transmissão de calor se processar simultaneamente quer por radiação quer por convecção, o fluxo de calor é dado por:

$$q_{cr} = q_c + q_r \quad (5.6)$$

Para a situação particular da temperatura ambiente e da temperatura do corpo terem o mesmo valor, ou seja:

$$\theta_\infty = \theta_a$$

simplifica-se a Equação 5.6 para,

$$q_{cr} = \alpha_{cr} (\theta - \theta_\infty) \quad (5.7)$$

onde

$$\alpha_{cr} = \alpha_c + \alpha_r \quad (5.8)$$

sendo

$\alpha_{cr}$  coeficiente de transmissão de calor combinado de convecção/ radiação [W/m<sup>2</sup>K].

### 5.1.2. Discretização por elementos finitos

Segundo VILA REAL (2003), partindo da Equação 5.1 e das suas condições de fronteira, aplicando o método dos resíduos pesados, usando elementos finitos  $\Omega^e$  para discretizar o domínio, uma formulação fraca, e o método de Galerkin, obtém-se o seguinte sistema de equações diferenciais:

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{F} \quad (5.9)$$

onde

$$K_{lm} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \left( \frac{\partial N_l}{\partial x} \lambda \frac{\partial N_m}{\partial x} + \frac{\partial N_l}{\partial y} \lambda \frac{\partial N_m}{\partial y} \right) d\Omega^e + \sum_{e=1}^H \int_{\Gamma_c^e} \alpha_{cr} N_l N_m d\Gamma_c^e \quad (5.10)$$

$$C_{lm} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \rho c_p N_l N_m d\Omega^e \quad (5.11)$$

$$F_l = \sum_{e=1}^E N_l \dot{Q} d\Omega^e - \sum_{e=1}^Q \int_{\Gamma_q^e} N_l \bar{q} d\Gamma_q^e + \sum_{e=1}^H \int_{\Gamma_c^e} N_l \alpha_{cr} \theta_{\infty} d\Gamma_c^e \quad (5.12)$$

em que

E número total de elementos;

Q número de elementos com fronteira tipo  $\Gamma_q$ ;

H número de elementos com fronteira tipo  $\Gamma_c$  e/ou  $\Gamma_r$ ;

$N_l$  função de forma;

$N_m$  função de forma.

Onde  $N_l$  e  $N_m$  são funções de forma, isto é, funções lineares que, através de interpolações vão fazendo a equação aproximar-se do valor exacto.

Adoptando uma discretização ao longo do tempo através de diferenças finitas, o sistema de Equações 5.9 resulta na seguinte fórmula de recorrência:

$$\hat{\mathbf{K}}_{n+\alpha} \boldsymbol{\theta}_{n+\alpha} = \hat{\mathbf{F}}_{n+\alpha} ; \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad n \in (0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (5.13)$$

onde

$$\hat{\mathbf{K}}_{n+\alpha} = \mathbf{K}_{n+\alpha} + \frac{1}{\alpha \Delta t} \mathbf{C}_{n+\alpha} ; \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (5.14)$$

$$\hat{\mathbf{F}}_{n+\alpha} = \mathbf{F}_{n+\alpha} + \frac{1}{\alpha \Delta t} \mathbf{C}_{n+\alpha} \boldsymbol{\theta}_n ; \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (5.15)$$

Resolvido o sistema de Equações 5.13 para  $\boldsymbol{\theta}_{n+\alpha}$  no instante  $t_{n+\alpha}$ , o valor de  $\theta$  no final do intervalo de tempo  $\Delta t$ , ou seja, no instante  $t_{n+1}$ , é dado por:

$$\theta_{n+1} = \frac{1}{\alpha} \theta_{n+\alpha} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \theta_n \quad (5.16)$$

sendo estas as condições iniciais do intervalo de tempo seguinte.

De acordo com FRANSSEN (2010), fazendo variar o parâmetro  $\alpha$ , obtêm-se vários esquemas de integração no tempo. No caso de  $\alpha \neq 0$ , os esquemas denomina-se como implícitos, sendo os mais comuns o de Crank-Nicolson( $\alpha=1/2$ ), Galerkin( $2/3$ ) e de Euler-Backward( $\alpha=1$ ) .

Ainda de acordo com o mesmo autor, o algoritmo apresentado da Equação 5.13 a 5.16 possui a mesma estabilidade quer seja um problema linear ou não-linear, sendo *incondicionalmente estável* quando  $\alpha \geq 1/2$ , isto é, vai ocorrer sempre a convergência ainda que algumas oscilações possam ocorrer caso o intervalo de tempo seja demasiado extenso.

### 5.1.2.Campo de temperaturas obtido por elementos finitos – SAFIR 2007

O SAFIR - 2007 é um programa informático para análise de estruturas sob condições de temperatura ambiente elevada. O programa, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), pode ser usado para estudar o comportamento de estruturas bidimensionais e tridimensionais.

Este programa foi desenvolvido pelo Professor Jean-Marc Franssen da Universidade de Liège, na Bélgica, correspondendo à segunda geração de códigos de incêndio desenvolvidos em Liège. A primeira geração resultou noutro programa de computador chamado CEFICOSS-1,2.

Como programa de elementos finitos, SAFIR - 2007 possui diferentes tipos de elementos, procedimentos de cálculo e modelos de comportamento tensão-deformação, permitindo a utilização de elementos 2-D ou 3-D, elementos tipo viga, elementos de casca e elementos de treliça.

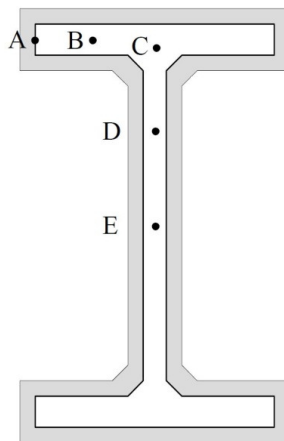
O programa SAFIR - 2007 utiliza ficheiros de input (.IN) podendo estes ser criados em qualquer programa de processamento de texto com a extensão (.TXT) ou criados através de um pré-processador ou gerador de malha, podendo para este efeito ser utilizado o GID ou o SAFIRWIZARD, que permite a rápida criação de um ficheiro de input 2D para análise térmica. Na presente dissertação foram utilizados ambos estes geradores de malha.

Para tratamento dos resultados do programa SAFIR - 2007 fornecidos através de ficheiro (.OUT) , utilizou-se o pós-processador DIAMOND - 2009, que permite visualizar a estrutura e seus resultados graficamente ao longo do tempo. Utilizou-se ainda o programa SAFIREXTRACT, para a exportação dos resultados para folha de cálculo.

O passo de cálculo para o SAFIR - 2007 é definido pelo utilizador sendo que o passo mínimo é  $\Delta t = 1$  [s].

Na presente dissertação, foi efectuado um estudo a fim de se definir o passo de cálculo mais adequado para utilizar na análise. Foram comparados resultados referentes a dois perfis comuns, HEB100 e HEB400, em três pontos representativos dos perfis (Pontos A, C, E) representado na Figura 5.1.

Os pontos referidos na Figura 5.1 serviram como referência para a comparação de resultados em toda a presente dissertação.



**Figura 5.1 – Pontos utilizados para comparação de resultados**

As percentagens de erro indicadas na Tabela 5.1 foram obtidas admitindo os resultados para  $\Delta t = 1$  [s] como exactos, sendo calculadas em função da sua variação relativamente a este passo. A simulação numérica foi efectuada para a curva de incêndio padrão ISO834 durante 60 minutos, tendo-se avaliado, além do erro relativo inerente aos diferentes passos, o tempo necessário para o programa processar os dados e produzir os resultados.

**Tabela 5.1 - Resultados dos erros para diferentes passos de cálculo**

Passo de cálculo [s]	Erro máximo [%]		Tempo de cálculo [s]
	HEB100	HEB400	
$\Delta t = 1$	0	0	105
$\Delta t = 2$	0.40 (Ponto C )	0.15 (Ponto C)	54
$\Delta t = 10$	3.49 (Ponto C)	1.38 (Ponto C)	13
$\Delta t = 20$	7.12 (Ponto C)	2.75 (Ponto C)	7
$\Delta t = 50$	16.26 (Ponto C)	6.72 (Ponto C)	3

De seguida são apresentados gráficos demonstrando que o referido erro diminui com o tempo de forma semelhante para todos os perfis e pontos considerados.

### PERFIL HEB100

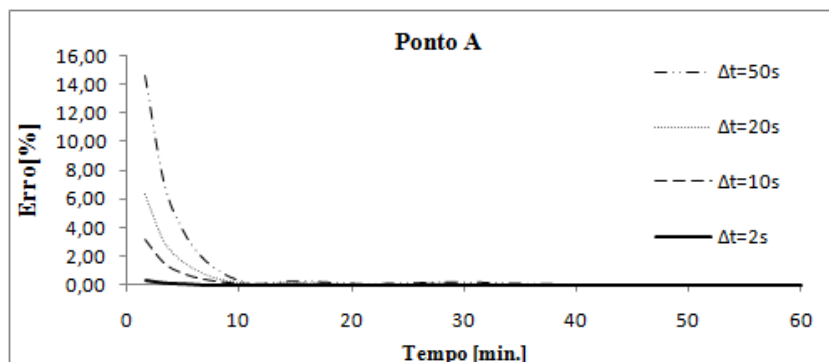


Figura 5.2 – Erro em função do tempo, para HEB100 sujeito à curva ISO - 834

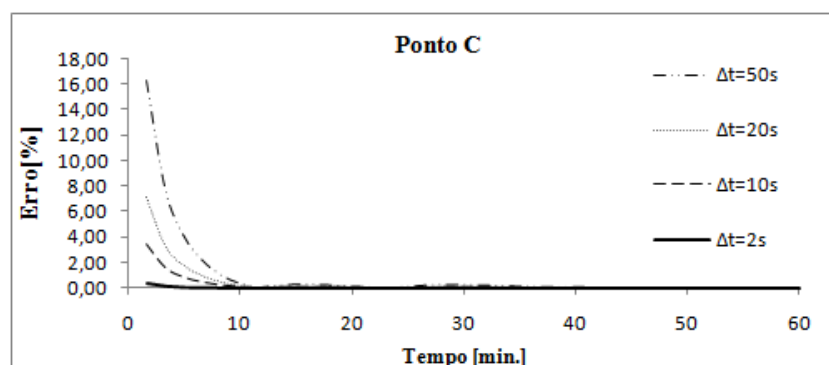


Figura 5.3 – Erro em função do tempo, para HEB100 sujeito à curva ISO - 834

### PERFIL HEB400

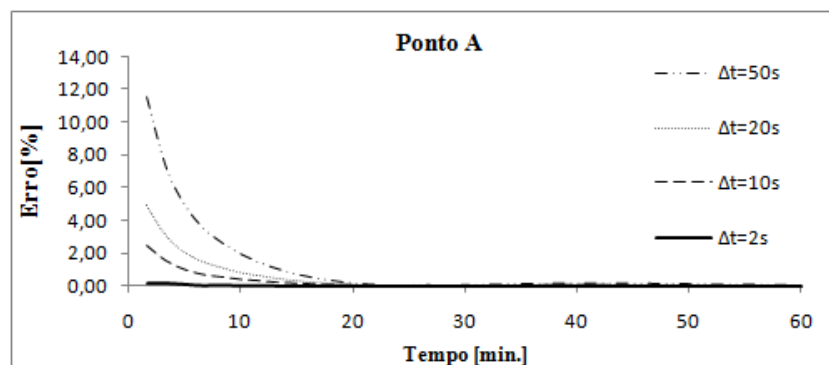


Figura 5.4 – Erro em função do tempo, para HEB400 sujeito à curva ISO - 834

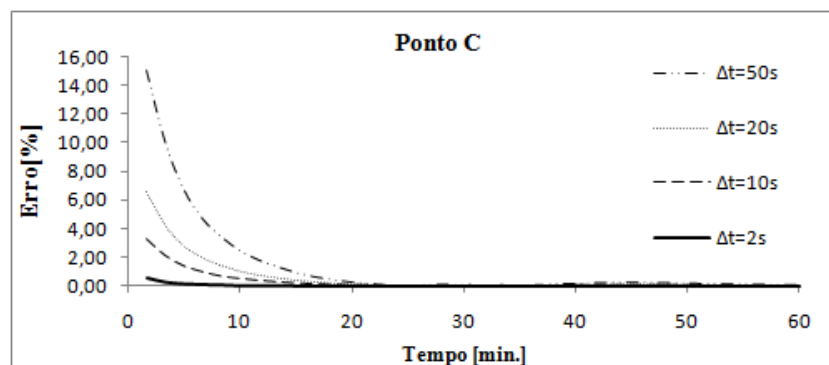


Figura 5.5 – Erro em função do tempo, para HEB400 sujeito à curva ISO - 834

Observando a Tabela 5.1 e as Figuras 5.2 a 5.6, optou-se por efectuar a modelação utilizando  $\Delta t = 2$  [s], quer por conduzir a resultados perfeitamente aceitáveis, com taxas de erro máximas de 0.15%, quer por não exigir um esforço de processamento excessivo. A esse respeito, refere-se que foi efectuada uma modelação do perfil HEB400 com  $\Delta t = 1$  [s] durante 300 minutos. O tempo de processamento foi cerca de 5 horas e obteve-se um ficheiro de output com cerca de 90 Gigabytes, o que tornou impossível analisar os resultados.

Outro parâmetro a considerar na modelação foi a tolerância e a sua influência no cálculo. De modo a convergir para uma solução, um valor de tolerância tem de ser especificado no ficheiro de input do programa. De facto o SAFIR – 2007 utiliza um processo iterativo de forma a convergir para a solução correcta a cada incremento. Neste processo, o programa necessita de assegurar esta tolerância atingida em cada etapa do cálculo de forma a existir convergência.

Assim foi modelado um perfil HEB400 de 495 nós sujeito à curva ISO834 com  $\Delta t = 2$  [s] durante 60 minutos. Os resultados são expressos na Figura 5.7.

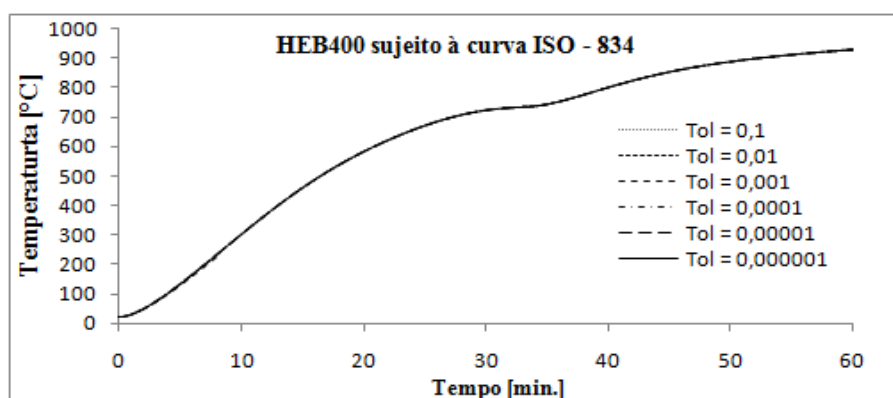


Figura 5.6 – Influência da tolerância de cálculo na evolução da temperatura

Como se pode verificar pela Figura 5.7 as curvas são coincidentes para qualquer das tolerâncias testadas, pelo que se optou pela tolerância predefinida pelo programa, igual a  $10^{-3}$ . Relativamente à malha de elementos finitos utilizados, esta foi criada de forma a se conseguir o número máximo de elementos e nós permitido pela versão de demonstração disponibilizada pela Universidade de Liège, ou seja 500 nós.

Assim no caso da utilização do gerador de malha SAFIRWIZARD, utilizou-se uma malha com 408 elementos rectangulares planos correspondendo a 495 nós, como a Figura 5.8(a).

Utilizando o gerador de malha GID 10.0.4, para o caso de secções tubulares, a malha utilizada é a apresentada de seguida na Figura 5.8(b).

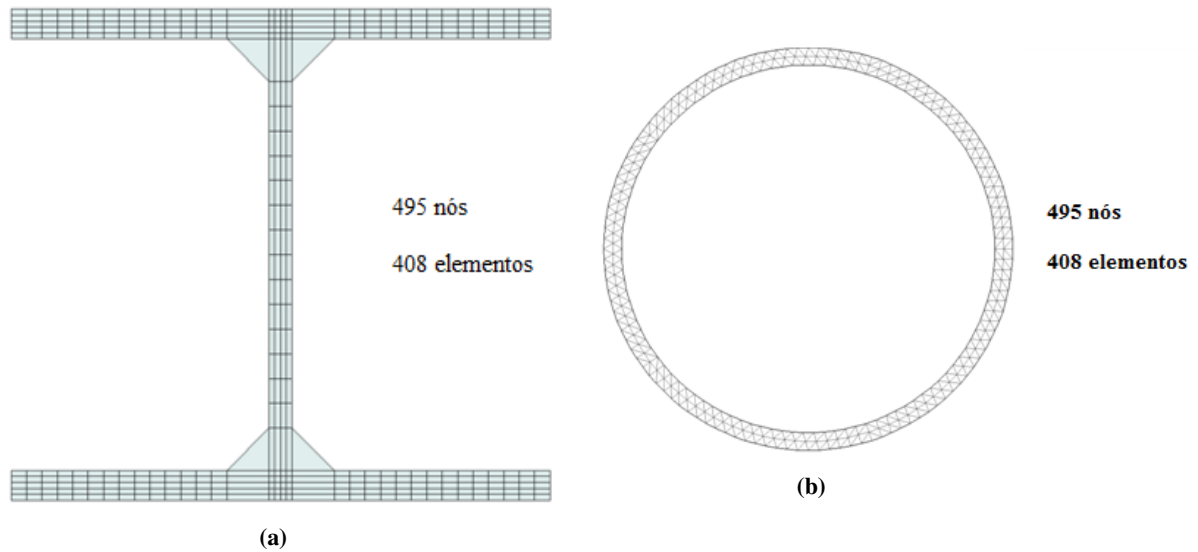


Figura 5.7 – Malha utilizada na modelação: (a) Utilizando o SAFIRWIZARD; (b) Utilizando o GID 10.0.4

## 5.2.Métodos Simplificados de Cálculo – Equações Simplificadas do Eurocódigo 3

### 5.2.1.Factor de massividade

Antes de descrever os métodos simplificados, há que introduzir o conceito de *factor de massividade* ou *factor de forma*. De facto esta grandeza é essencial no cálculo da evolução das temperaturas, já que o aumento destas mesmas temperaturas é proporcional a este parâmetro.

Para elementos sem protecção térmica, define-se factor de massividade,  $A_m/V$ , como a relação entre a área exposta ao fogo,  $A_m$ , e o volume desse mesmo elemento,  $V$ . Para barras prismáticas, este factor resulta numa relação entre o perímetro exposto ao fogo,  $P$ , e a área da secção transversal do elemento,  $A$ , como se mostra na Equação 5.17.

$$\frac{A_m}{V} = \frac{P \cdot l}{A \cdot l} = \frac{P}{A} \quad (5.17)$$

Sendo  $l$  o comprimento do elemento.

A Figura 5.9, retirada do Eurocódigo 3, Parte 1.2 e fornece as expressões usualmente empregues para determinação do *factor de massividade* ou *factor de forma* para elementos metálicos sem revestimento contra fogo.



## Evolução da Temperatura em Elementos de Aço Sujeitos ao Fogo

### Evolução da Temperatura no Aço

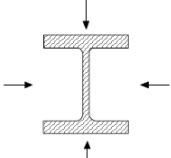
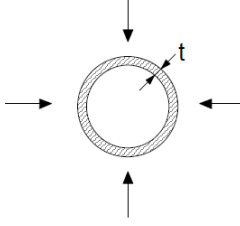
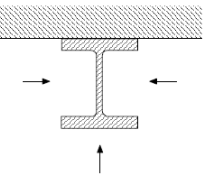
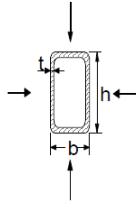
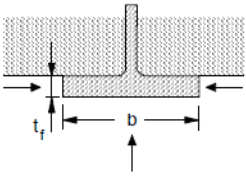
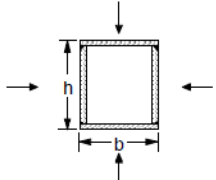
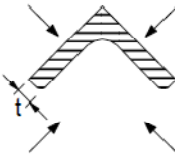
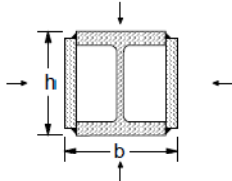
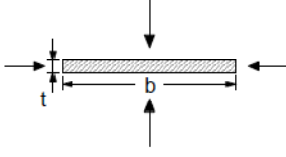
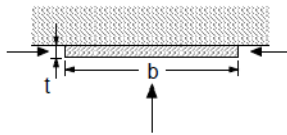
<p><i>Secção aberta exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da secção transversal}}$ 	<p><i>Tubo exposto ao fogo em todos os lados: <math>A_m/V = 1/t</math></i></p> 
<p><i>Secção aberta exposta ao fogo em três lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{superfície exposta ao fogo}}{\text{área da secção transversal}}$ 	<p><i>Secção tubular (ou secção em caixão soldada de espessura uniforme) exposta ao fogo em todos os lados:</i>  <i>Se <math>t \ll b</math>: <math>A_m/V \approx 1/t</math></i></p> 
<p><i>Banzo de secção em I exposto ao fogo em três lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = (b + 2t_f) / (bt_f)$ <p><i>Se <math>t \ll b</math>: <math>A_m/V \approx 1/t_f</math></i></p> 	<p><i>Secção em caixão soldada exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{área da secção transversal}}$ <p><i>Se <math>t \ll b</math>: <math>A_m/V \approx 1/t</math></i></p> 
<p><i>Cantoneira exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $A_m/V = 2/t$ 	<p><i>Secção em I com reforço em caixão, exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{área da secção transversal}}$ 
<p><i>Barra plana exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $A_m/V = 2(b + t) / (bt)$ <p><i>Se <math>t \ll b</math>: <math>A_m/V \approx 2/t</math></i></p> 	<p><i>Barra plana exposta ao fogo em três lados:</i></p> $A_m/V = (b + 2t) / (bt)$ <p><i>Se <math>t \ll b</math>: <math>A_m/V \approx 1/t</math></i></p> 

Figura 5.8 - Factor de massividade para elementos metálicos sem revestimento contra fogo [Fonte: Eurocódigo 3]

Segundo VILA REAL (2003) o termo “massividade” pode induzir em erro, pois o valor deste factor é tanto menor quanto maiores forem as espessuras das peças. A Figura 5.10. procura explicar graficamente esta situação.



Figura 5.9 – Influência do factor de massividade na temperatura de perfis metálicos [Fonte: VILA REAL (2003)]

A Figura 5.11, também retirada do Eurocódigo 3, parte 1.2, fornece expressões usualmente empregues para determinação do *factor de massividade* ou *factor de forma* para elementos metálicos com revestimento contra fogo.

Esquema	Descrição	Factor de massividade ( $A_p/V$ )
	Revestimento de contorno com espessura uniforme	$\frac{\text{perímetro do aço}}{\text{área da secção transversal do aço}}$
	Revestimento em caixão com espessura uniforme <sup>1)</sup>	$\frac{2(b + h)}{\text{área da secção transversal do aço}}$
	Revestimento de contorno com espessura uniforme, exposto ao fogo em três lados	$\frac{\text{perímetro do aço} - b}{\text{área da secção transversal do aço}}$
	Revestimento em caixão com espessura uniforme, exposto ao fogo em três lados <sup>1)</sup>	$\frac{2h + b}{\text{área da secção transversal do aço}}$

<sup>1)</sup> Normalmente as dimensões da folga,  $c_1$  e  $c_2$ , não deverão exceder  $h/4$ .

Figura 5.10 – Factor de massividade para elementos metálicos com protecção contra incêndio [Fonte: Eurocódigo 3]

### 5.2.2.Elementos não protegidos

De acordo com o estipulado pelo Eurocódigo 3, parte 1.2, no caso específico do aço, devido ao seu elevado valor de condutividade térmica, pode-se considerar que o campo de temperaturas no interior de um perfil metálico é uniforme.

Tendo isto em conta, a Equação 5.1 apresentada no início do capítulo simplifica-se devido à inexistência de gradientes térmicos, e pode ser representada pela Equação 5.18, apresentada de seguida:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (5.18)$$

onde,

$\Delta\theta_{a,t}$  variação da temperatura no perfil não protegido durante o intervalo de tempo  $\Delta t$  [°C];

$k_{sh}$  factor de correcção para o efeito de sombra;

Segundo TEWILT et al.,(2001) não é mais que um coeficiente empírico introduzido na Equação 5.18 de modo a que valores como o da emissividade da superfície do elemento,  $\varepsilon_m$ , e a emissividade do compartimento,  $\varepsilon_f$ , ambos valores realistas retirados de ensaios, possam ser utilizados.

Em FRANSSEN (2010), o efeito sombra resume-se a ser uma média ponderada do factor de configuração calculado em todo o perímetro da secção.

$A_m/V$  factor de massividade calculado de acordo com a Equação 5.17 [m<sup>-1</sup>];

$A_m$  área do perfil exposta ao fogo por unidade de comprimento [m<sup>2</sup>/m];

$V$  volume do perfil por unidade de comprimento [m<sup>3</sup>/m];

$c_a$  calor específico [J/KgK];

$\rho_a$  peso volúmico do aço;  $\rho_a = 7850$  [kg/m<sup>3</sup>];

$\dot{h}_{net,d}$  valor de calculo do fluxo de calor por unidade de área [W/m<sup>2</sup>];

$\Delta t$  intervalo de tempo ( $\leq 5$  s).

De acordo com o Eurocódigo 3, Parte 1.2,  $k_{sh}$  toma os seguintes valores:

$$k_{sh} = 0.9 \frac{[A_m/V]_b}{[A_m/V]} \quad \text{Para secções em I sujeitas a curvas de incêndios nominais.}$$

$$k_{sh} = \frac{[A_m/V]_b}{[A_m/V]} \quad \text{Para todos os outros casos ou conservativamente } (k_{sh} = 1).$$

onde,

$[A_m/V]_b$  factor de massividade calculado como o perfil tivesse protecção em caixão [m<sup>-1</sup>].

Relativamente ao valor de cálculo do fluxo de calor  $\dot{h}_{net}$ , este é descrito no Eurocódigo 1, Parte 1.2, sendo dado pela Equação 5.19 representada de seguida:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad [\text{W/m}^2] \quad (5.19)$$

onde:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad (5.20)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (5.21)$$

em que:

- $\dot{h}_{net,c}$  fluxo de calor por convecção [ $\text{W/m}^2$ ];
- $\dot{h}_{net,r}$  fluxo de calor por radiação [ $\text{W/m}^2$ ];
- $\alpha_c$  coeficiente de transferência de calor por convecção [ $\text{W/m}^2$ ];
- $\theta_g$  temperatura dos gases no compartimento de incêndio [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $\theta_m$  temperatura do perfil metálico [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $\theta_r$  temperatura da radiação vizinha do perfil, podendo tomar-se  $\theta_r = \theta_g$  [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $\Phi$  factor de configuração, que, de acordo com o Eurocódigo 1, deve ser tomado igual à unidade (efeito conservativo), podendo no entanto optar-se por um valor inferior (ver Equação 5.22) quando o incêndio é localizado e apenas uma parte do fluxo de calor emitido por este chega ao elemento (não abordado nesta dissertação) ou de modo a contabilizar o efeito de sombra;
- $\varepsilon_m$  emissividade relacionada com o material da superfície do elemento, preconizando-se no Eurocódigo 3 para aços carbono 0,7 e 0,4 para aços inoxidáveis;
- $\varepsilon_f$  emissividade relacionada com o compartimento de incêndio; Segundo o Eurocódigo 3, Parte 1.2,  $\varepsilon_f = 1,0$

De acordo com o Eurocódigo 1,  $\alpha_c$  toma os seguintes valores representados na Tabela 5.2:

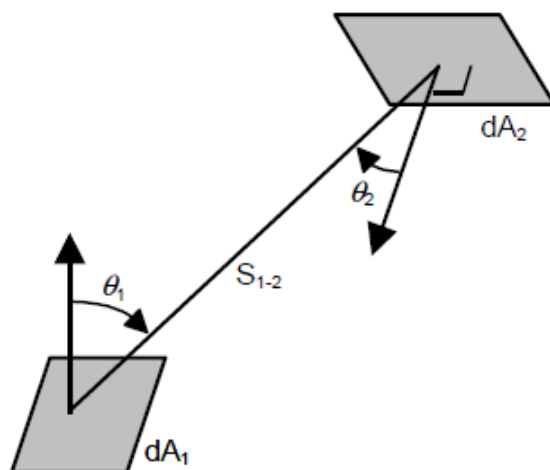
**Tabela 5.2 - Coeficiente de transferência de calor por convecção [Fonte Eurocódigo 3]**

<b>Superfície exposta ao fogo</b>	<b><math>\alpha_c</math> [<math>\text{W/m}^2</math>]</b>
Curva de incêndio padrão ISO 834	25
Curva de incêndio para elementos exteriores	25
Curva de incêndio de hidrocarbonetos	50
<b>Superfície não exposta ao fogo</b>	<b><math>\alpha_c</math> [<math>\text{W/m}^2</math>]</b>
Quando a radiação é considerada separadamente	4
Quando se incluem os efeitos de transferência de calor por radiação.	9

Relativamente à Equação 5.18, o Eurocódigo 3, impõe um limite mínimo para o factor de massividade,  $A_m/V \geq 10 \text{ [m}^{-1}\text{]}$ , valor este a partir do qual não se deverá considerar a temperatura uniforme em todo o perfil, condicionando por isso o uso desta equação.

No Eurocódigo 1, Parte 1.2 o factor de configuração,  $\Phi$ , é introduzido de forma a contabilizar as superfícies protegidas do perfil relativamente ao calor por radiação. É definido como o rácio entre o calor por radiação total que emana de uma dada superfície radiante e o calor que chega a uma dada superfície receptora, correspondendo à Equação 5.22 abaixo apresentada. O seu valor depende da dimensão da superfície radiante, da distância entre as superfícies radiante e receptora e da orientação relativa dessas superfícies como a Figura 5.12 apresenta.

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S_{1-2}^2} dA_2 \quad (5.22)$$



**Figura 5.11** Transferência de calor por radiação entre duas áreas infinitesimais [Fonte: Eurocódigo 1]

Com o intuito de utilizar a Equação 5.18, foram analisados diferentes intervalos de tempo de modo a ser escolhido aquele que conduziria a menores erros no cálculo. Sabendo que há que tomar valores de  $\Delta t \leq 5 \text{ s}$ , tomou-se  $\Delta t = 1 \text{ s}$  como passo mínimo e estudou-se  $\Delta t = 2 \text{ s}$ ,  $\Delta t = 3 \text{ s}$ ,  $\Delta t = 4 \text{ s}$  e  $\Delta t = 5 \text{ s}$ , apresentando-se na Figura 5.13 as correspondentes percentagens de erro em relação a  $\Delta t = 1 \text{ s}$ . Para este efeito, foi considerado um perfil HEB600 sujeito à curva de incêndio padrão ISO 834.

A título de curiosidade e para ver o porquê do Eurocódigo 3 limitar o passo  $\Delta t$  a 5s, apresentam-se também os resultados para  $\Delta t = 6 \text{ s}$ ,  $\Delta t = 10 \text{ s}$  e  $\Delta t = 20 \text{ s}$ .

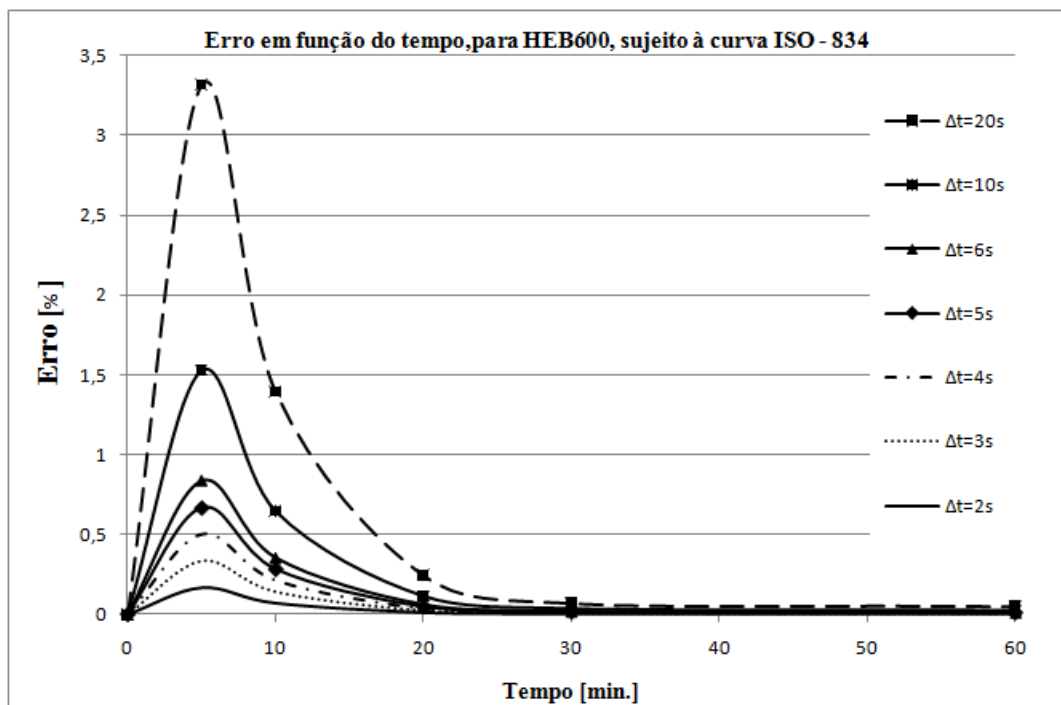


Figura 5.12 - Erro em função do tempo, para HEB600 sujeito à curva ISO – 834

É visível na Figura 5.13 que, após os minutos iniciais, o cálculo da evolução da temperatura utilizando o Método Simplificado preconizado no Eurocódigo 3, Parte 1.2 é pouco sensível à variação de  $\Delta t$ .

Não obstante, decidiu-se, para uma melhor comparação posterior com os resultados do programa comercial SAFIR – 2007, utilizar-se  $\Delta t = 1$  s, sendo que para efeitos de dimensionamento  $\Delta t = 5$  s seria suficiente.

De seguida apresenta-se a evolução da temperatura, utilizando o Método Simplificado, de perfis tipo HEB (Figura 5.15) e IPE (Figura 5.16), dois dos perfis mais utilizados na construção em Portugal. Consideraram-se as 4 faces expostas ao fogo, como a Figura 5.14 exemplifica, pretendendo-se assim simular um elemento isolado inserido numa situação de incêndio. São também apresentadas tabelas com os respectivos factores de massividade para os perfis considerados (Tabela 5.3 para perfis HEB e Tabela 5.4 para perfis IPE).

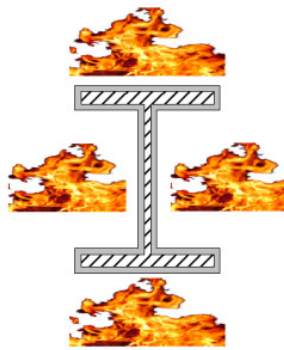


Figura 5.13 – Quatro faces expostas ao fogo

Tabela 5.3 - Factor de massividade  $A_m / V$  para perfis HEB não protegidos – 4 faces expostas ao fogo

	HEB100	HEB200	HEB300	HEB400	HEB500	HEB600
$A_m / V$	217.9	147.4	116.2	97.4	89.0	86.0

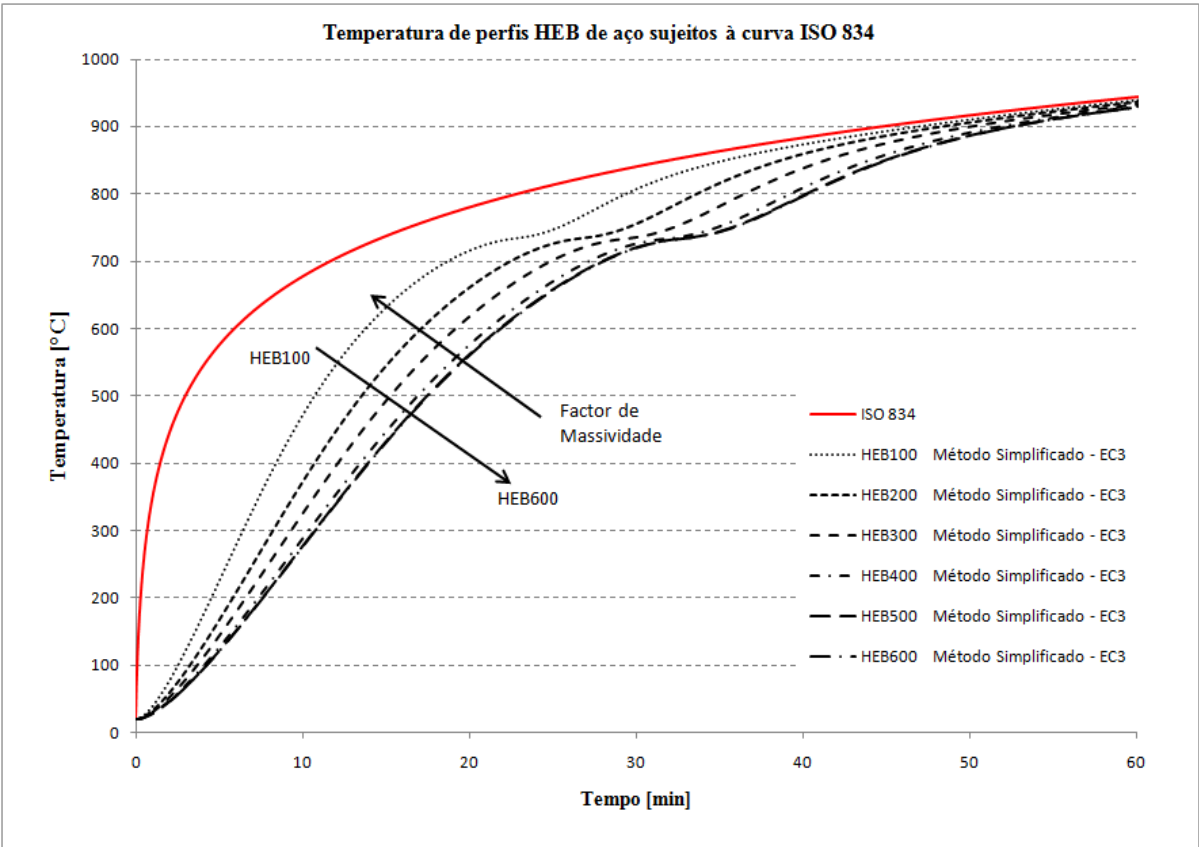


Figura 5.14 – Evolução da temperatura para diferentes tipos de perfis HEB

Tabela 5.4 - Factor de massividade  $A_m / V$  para perfis IPE não protegidos – 4 faces expostas ao fogo

	IPE100	IPE200	IPE300	IPE400	IPE500	IPE600
$A_m / V$	387.3	269.7	215.6	173.7	150.9	129.2

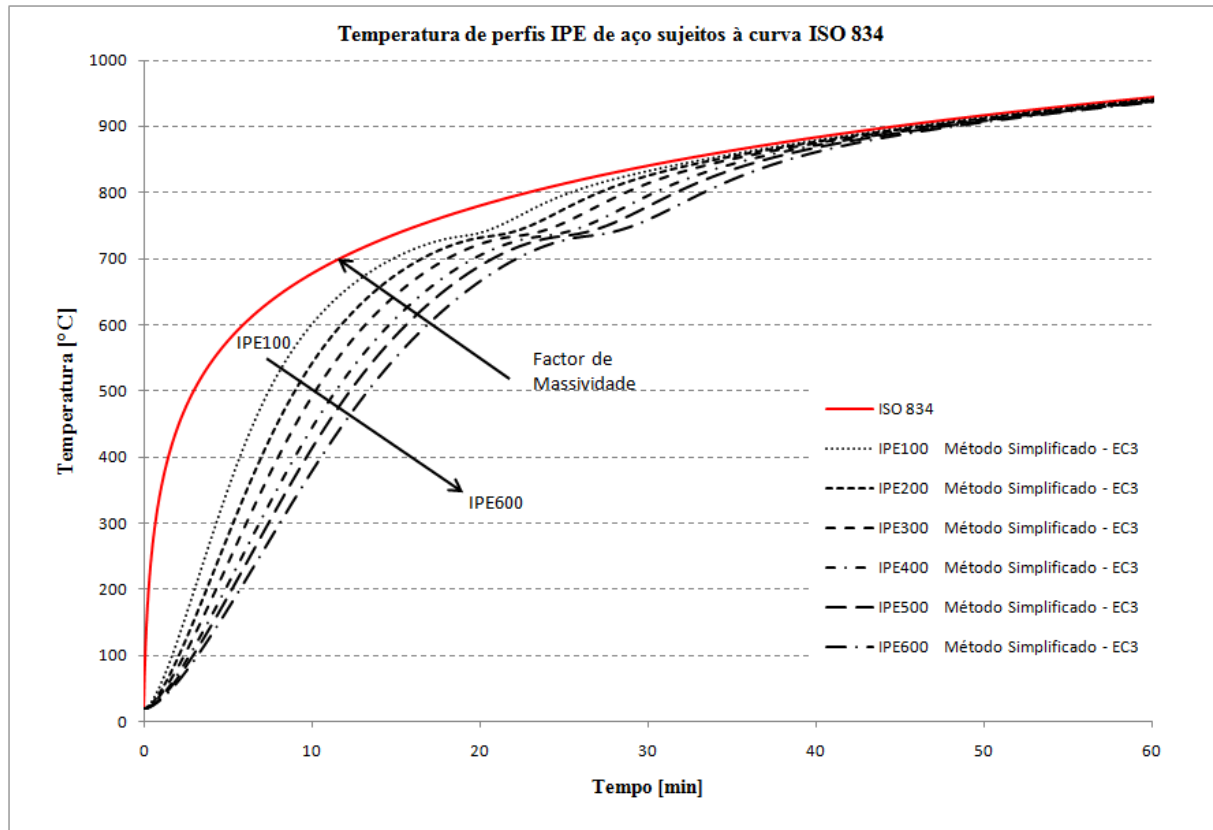


Figura 5.15 – Evolução da temperatura para diferentes tipos de perfis IPE

Como se pode observar, o factor de massividade é muito importante quando se utiliza este método, pois os resultados são proporcionais a este parâmetro. Logo, é de extrema importância o seu cálculo correcto. No Anexo I são apresentados alguns factores de massividade no intuito de agilizar e diminuir as probabilidades de erro na sua determinação.

#### 5.2.2.1. Comparação Método Simplificado vs SAFIR - 2007

Como referido anteriormente, foram modelados vários perfis dos tipos HEB e IPE, de modo a serem comparados os resultados com os produzidos pelo Método Simplificado. Estas comparações são apresentadas de seguida nas Figuras 5.17 a 5.20 para o tempo de exposição de 60 minutos, com base nos dados relativos aos cinco pontos especificados na Figura 5.1. À semelhança do caso anterior, consideram-se todas as faces do perfil sujeitas ao fogo.



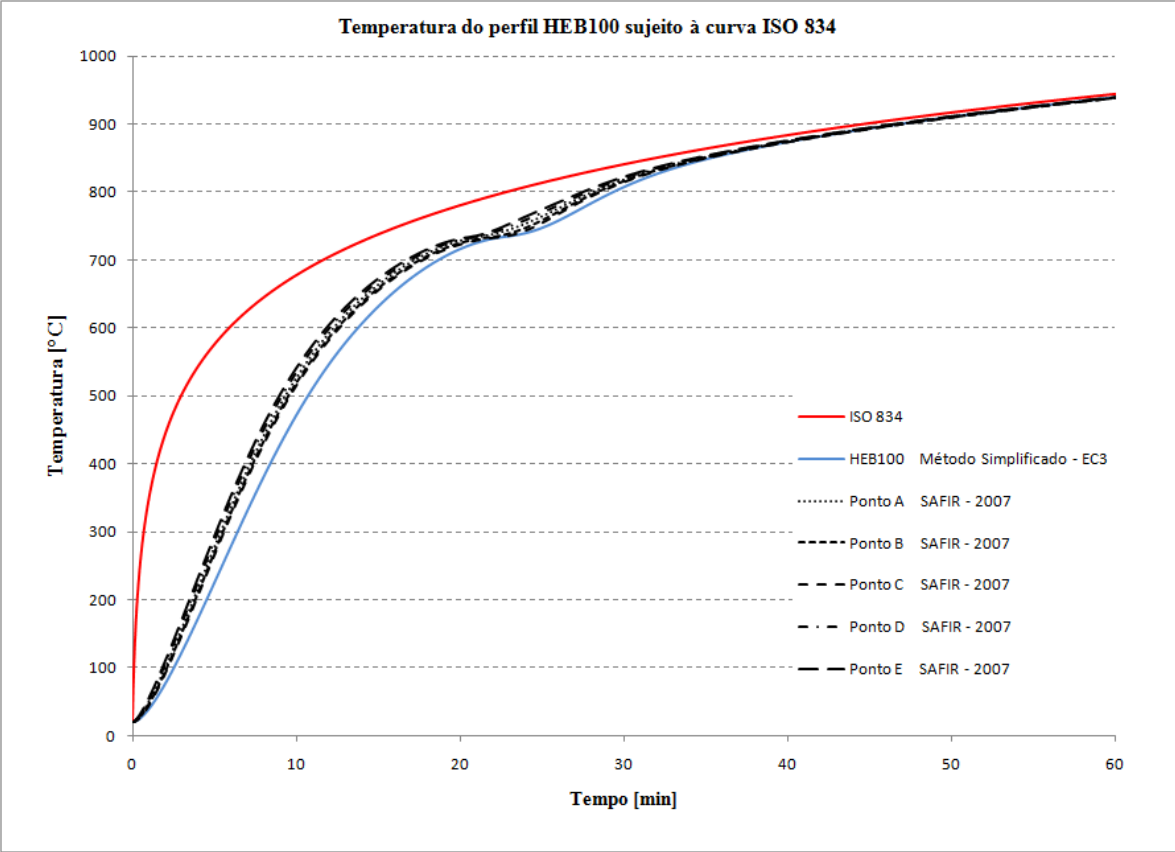


Figura 5.16 – Perfil HEB100 - Método Simplificado VS SAFIR

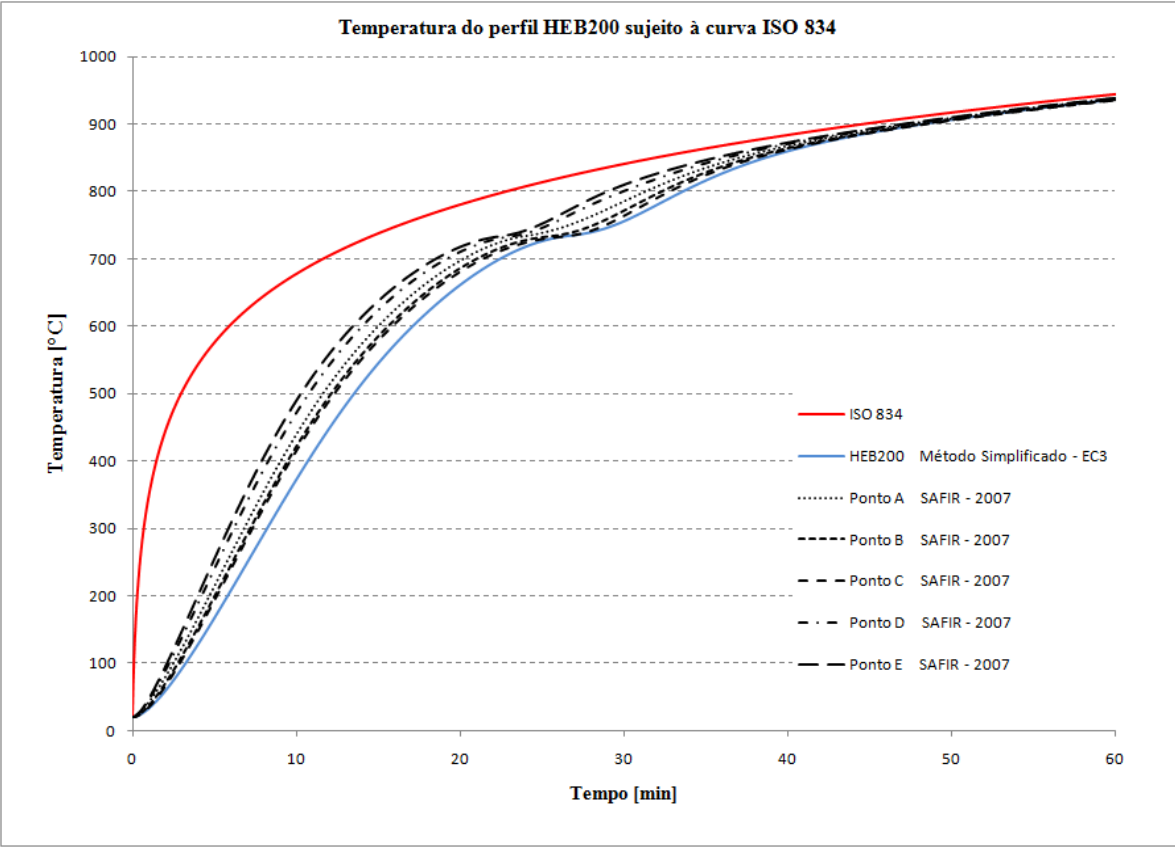


Figura 5.17 – Perfil HEB200 - Método Simplificado VS SAFIR

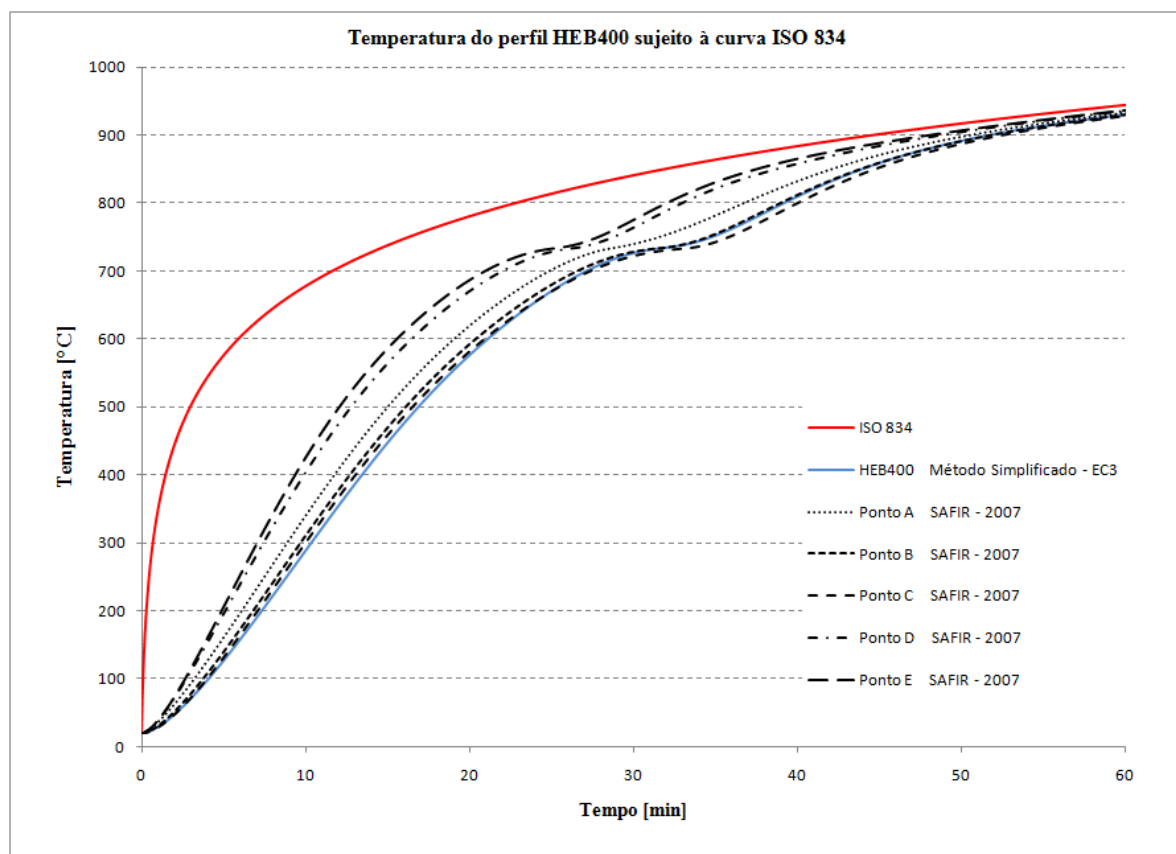


Figura 5.18 – Perfil HEB400 - Método Simplificado VS SAFIR

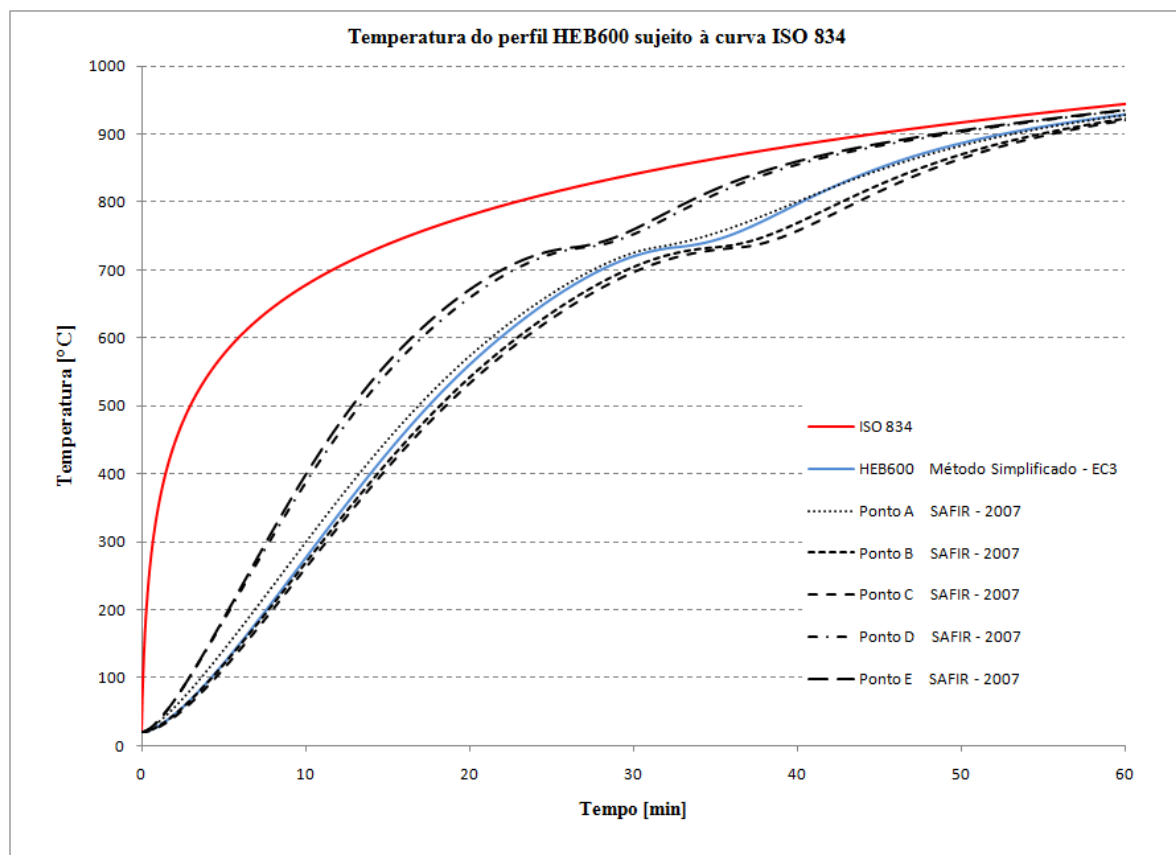
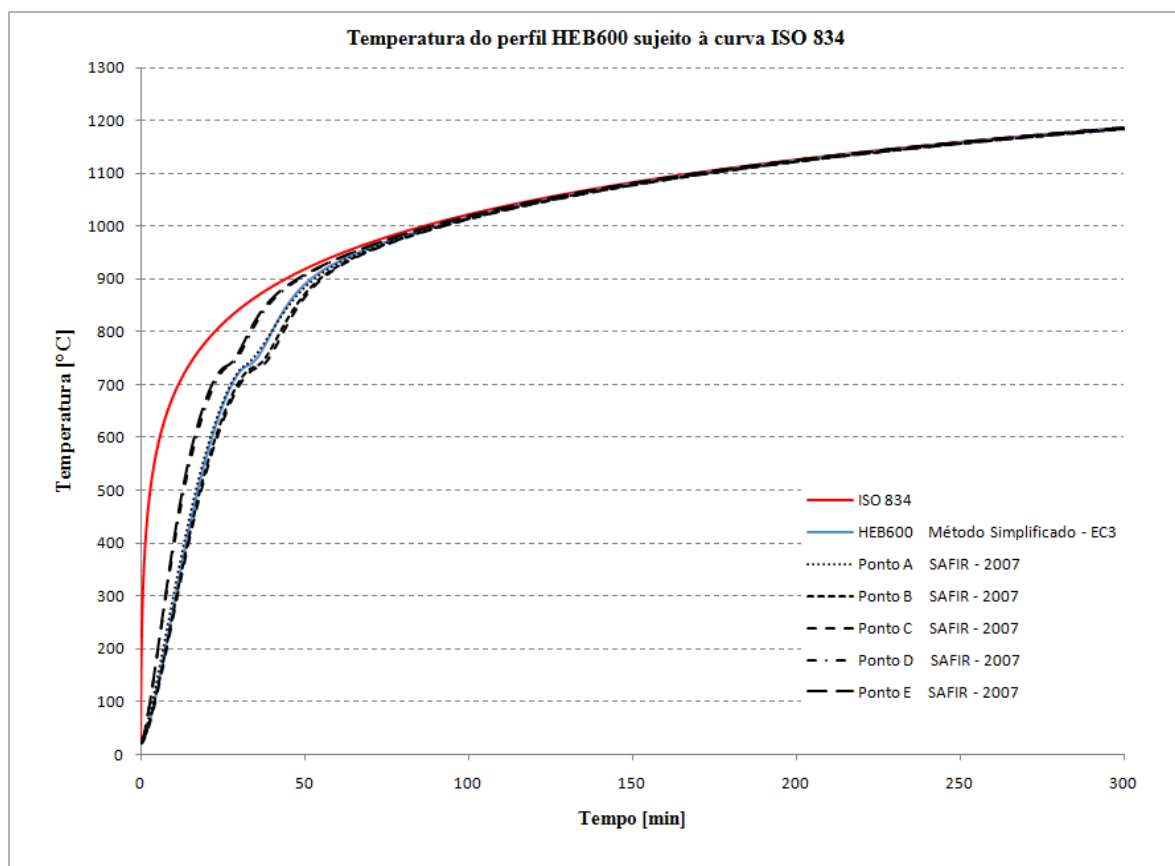


Figura 5.19 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR

Mesmo no perfil HEB600, com um factor de massividade menor e consequentemente com menor acréscimo de temperatura ao longo do tempo, observa-se uma excelente convergência entre o Método Simplificado descrito no Eurocódigo 3 e o programa SAFIR - 2007 ao fim de 60 minutos, como se pode verificar na Figura 5.20. Este facto é ainda mais evidente se o tempo de exposição for alargado para 300 minutos, como se observa na Figura 5.21, apresentada de seguida.

No entanto, é notório um afastamento progressivo dos resultados obtidos pelo programa SAFIR – 2007 para os pontos D e E relativamente ao Método Simplificado preconizado no Eurocódigo 3.



**Figura 5.20 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR**

Do mesmo modo foram modelados diversos perfis IPE, sendo os resultados indicados de seguida.

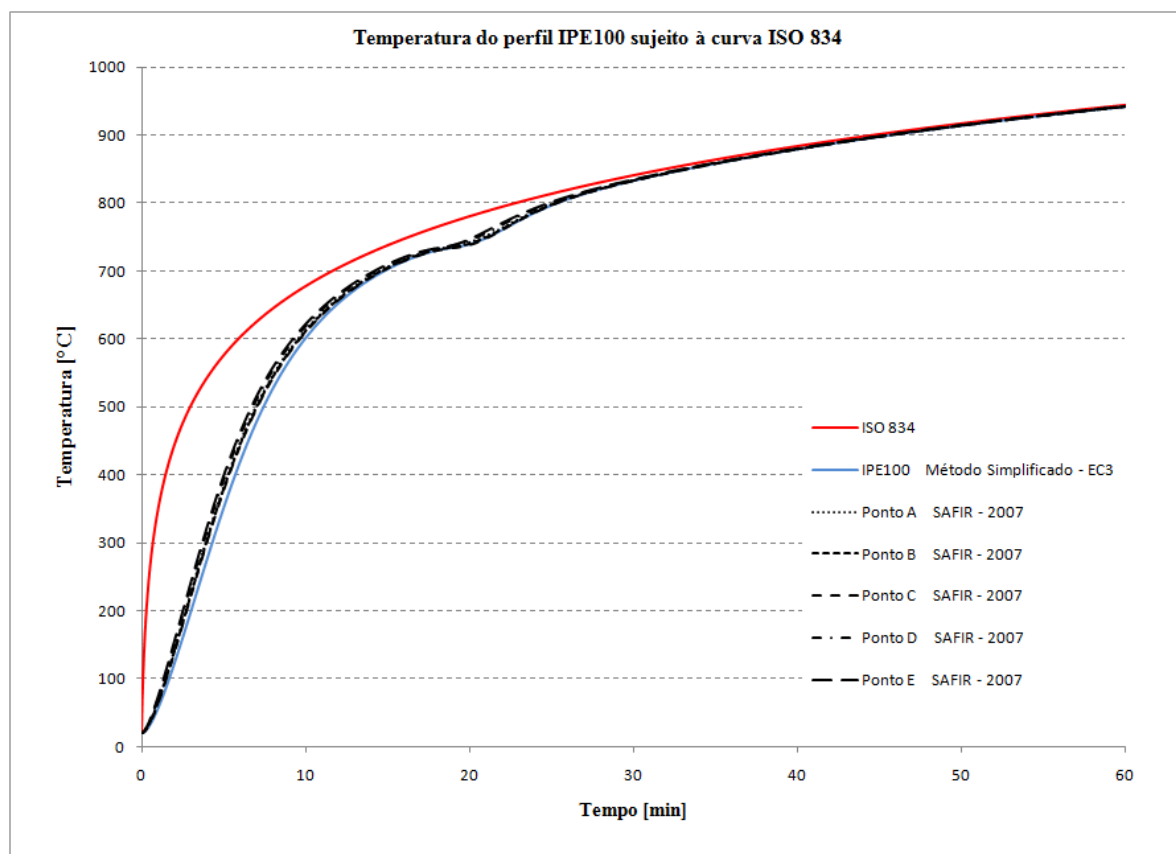


Figura 5.21 – Perfil IPE100 - Método Simplificado VS SAFIR

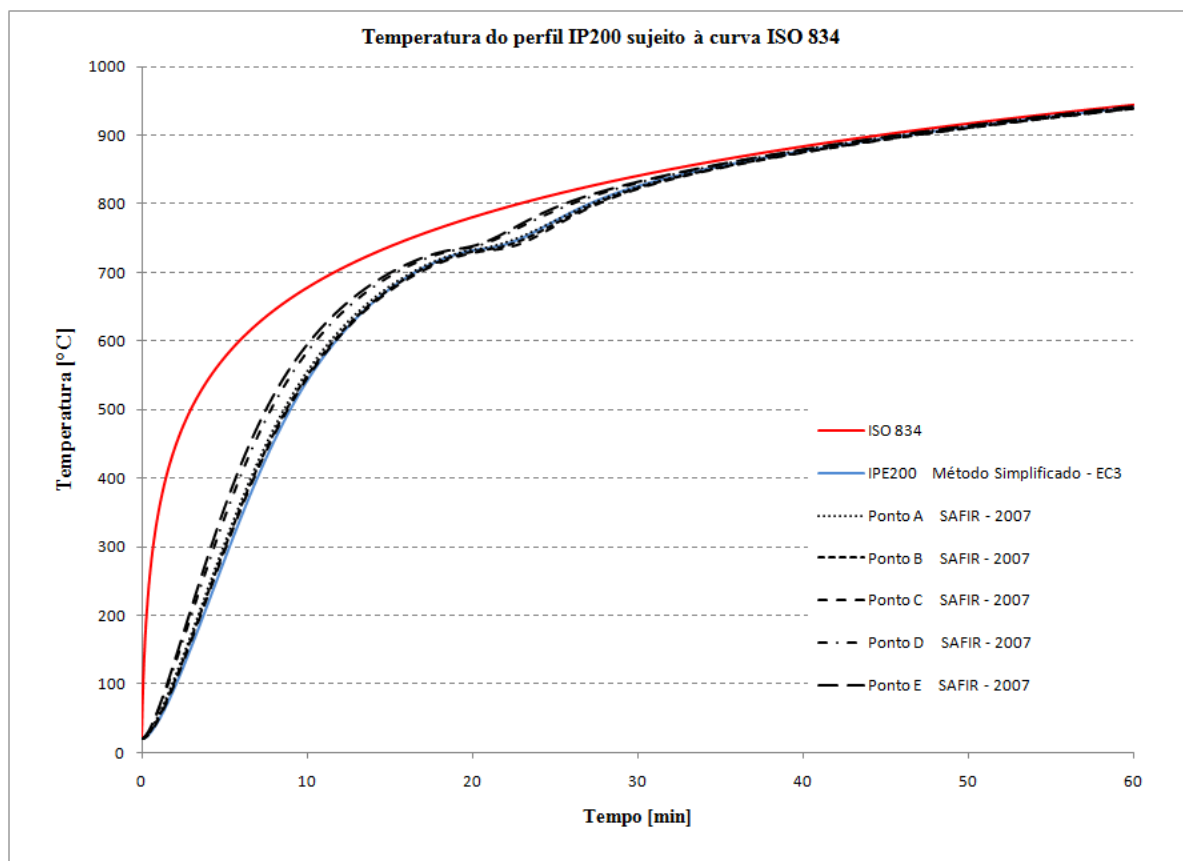


Figura 5.22 – Perfil IPE200 - Método Simplificado VS SAFIR

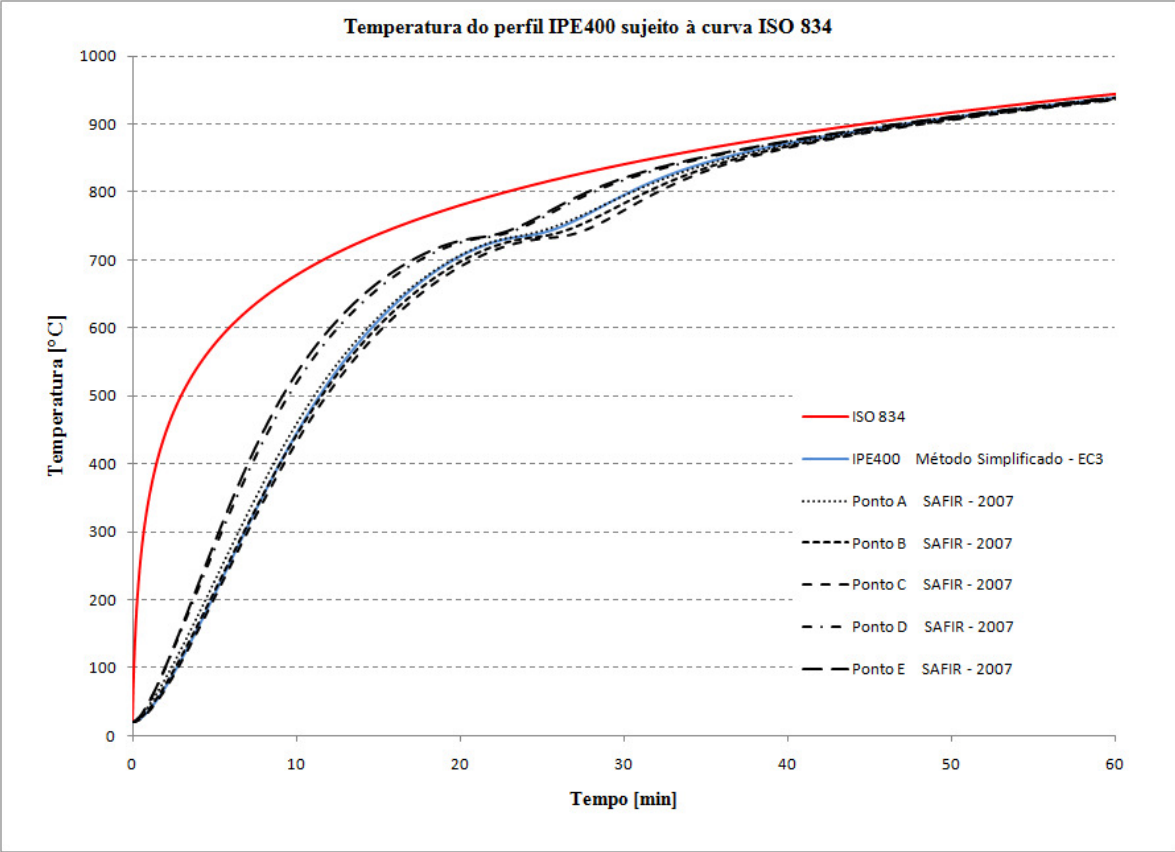


Figura 5.23 – Perfil IPE400 - Método Simplificado VS SAFIR

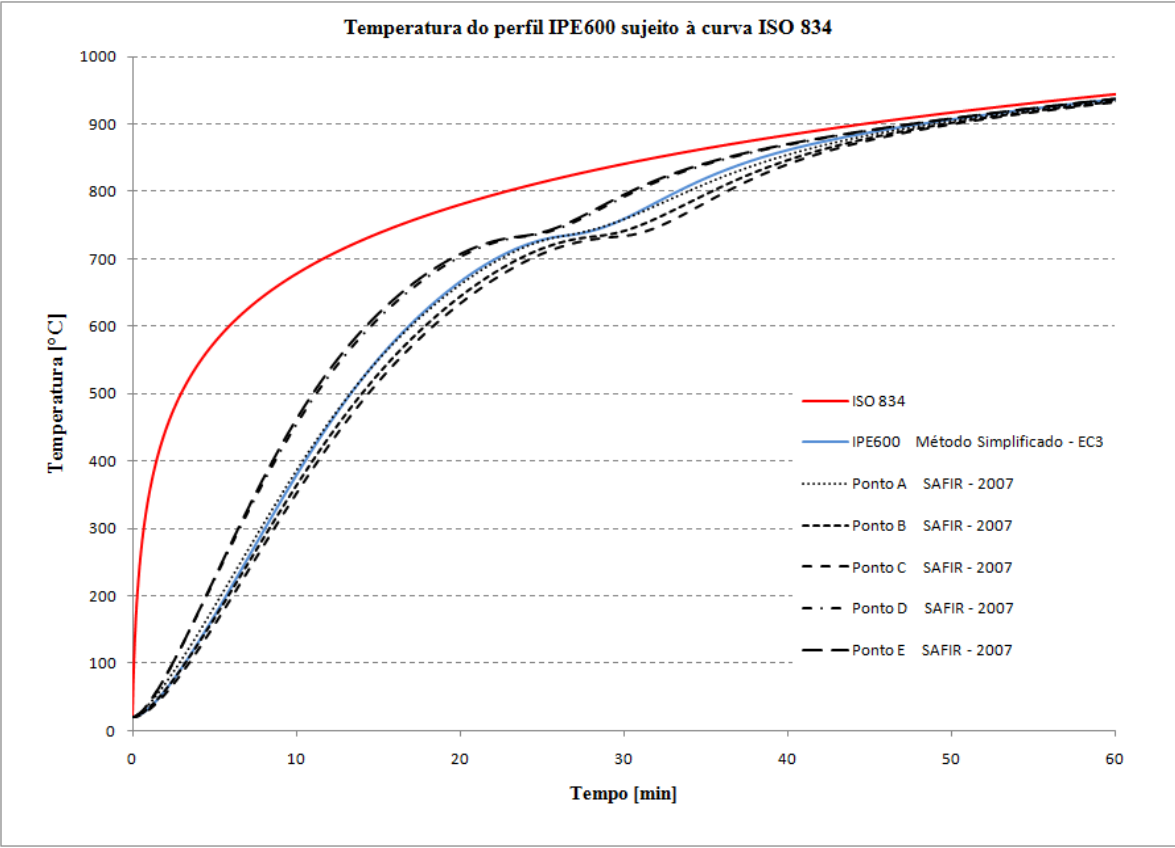


Figura 5.24 – Perfil IPE600 - Método Simplificado VS SAFIR

Mais uma vez, os resultados entre o programa SAFIR - 2007 e o Método Simplificado são mais afastados para perfis com factores de massividade menores, continuando contudo a existir convergência após 60 minutos, como a Figura 5.26 demonstra.

Assiste-se também para os perfis tipo IPE, uma discrepância entre os dados relativos às temperaturas resultantes do programa de cálculo automático para os pontos D e E, e o Método Simplificado. Contudo esta discrepância é menos pronunciada quando comparada com os perfis HEB estudados anteriormente.

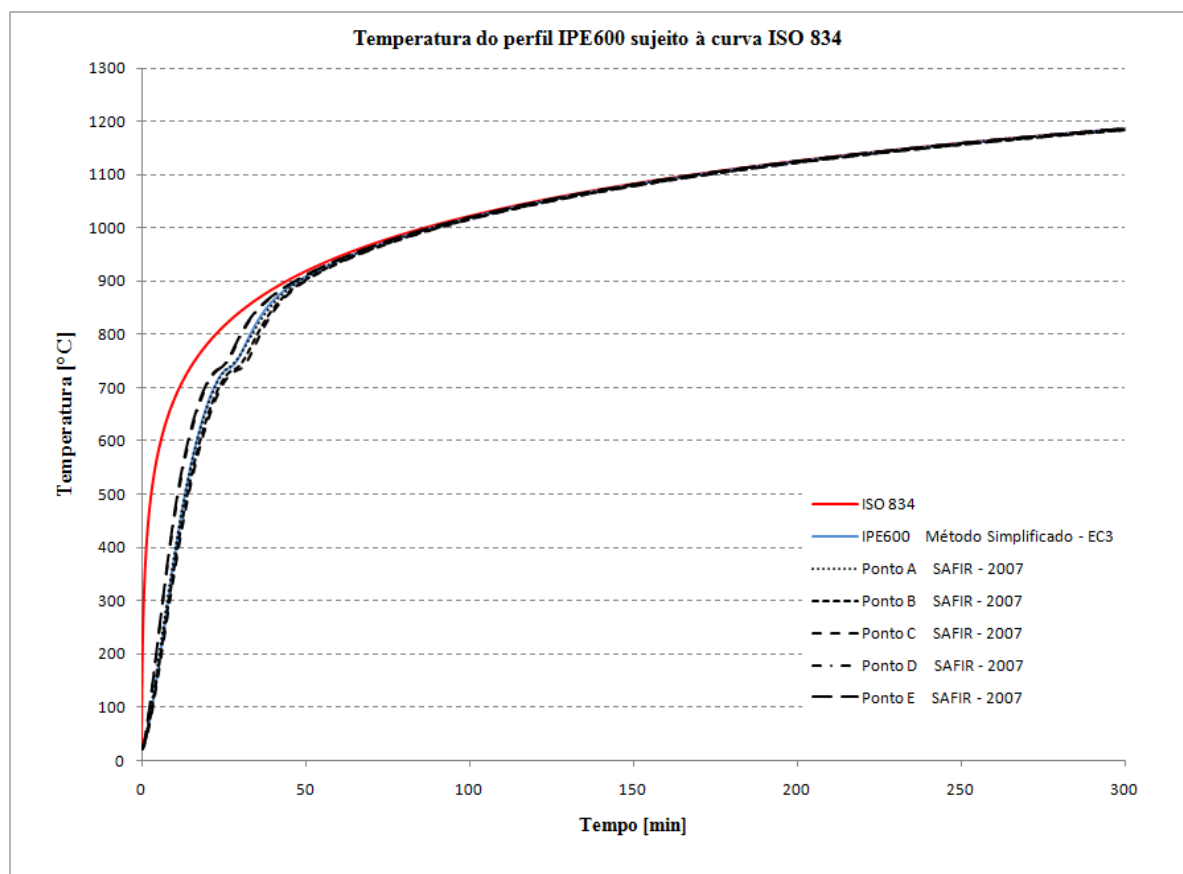


Figura 5.25 – Perfil IPE600 - Método Simplificado VS SAFIR

De seguida, apresenta-se um estudo idêntico para os mesmos perfis mas admitindo apenas 3 faces sujeitas ao fogo, como a Figura 5.27 ilustra.

A Tabela 5.5 contém os correspondentes factores de massividade para os perfis HEB estudados, sendo os resultados correspondentes apresentados nas Figuras 5.28 a 5.31.



Figura 5.26 – Três faces expostas ao fogo

Tabela 5.5 - Factor de massividade  $A_m / V$  para perfis HEB não protegidos – 3 faces expostas ao fogo

	HEB100	HEB200	HEB400	HEB600
$A_m / V$	179.5	121.8	82.2	74.9

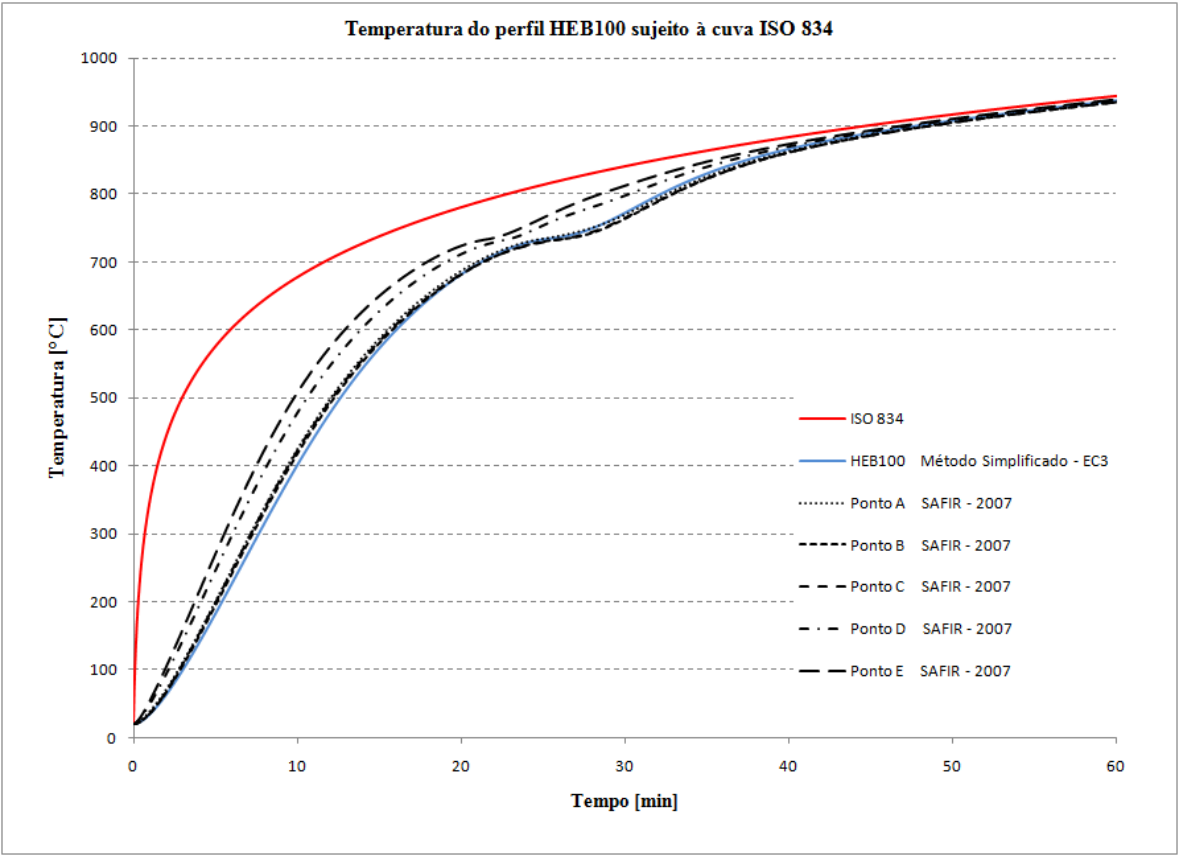


Figura 5.27 – Perfil HEB100 - Método Simplificado VS SAFIR

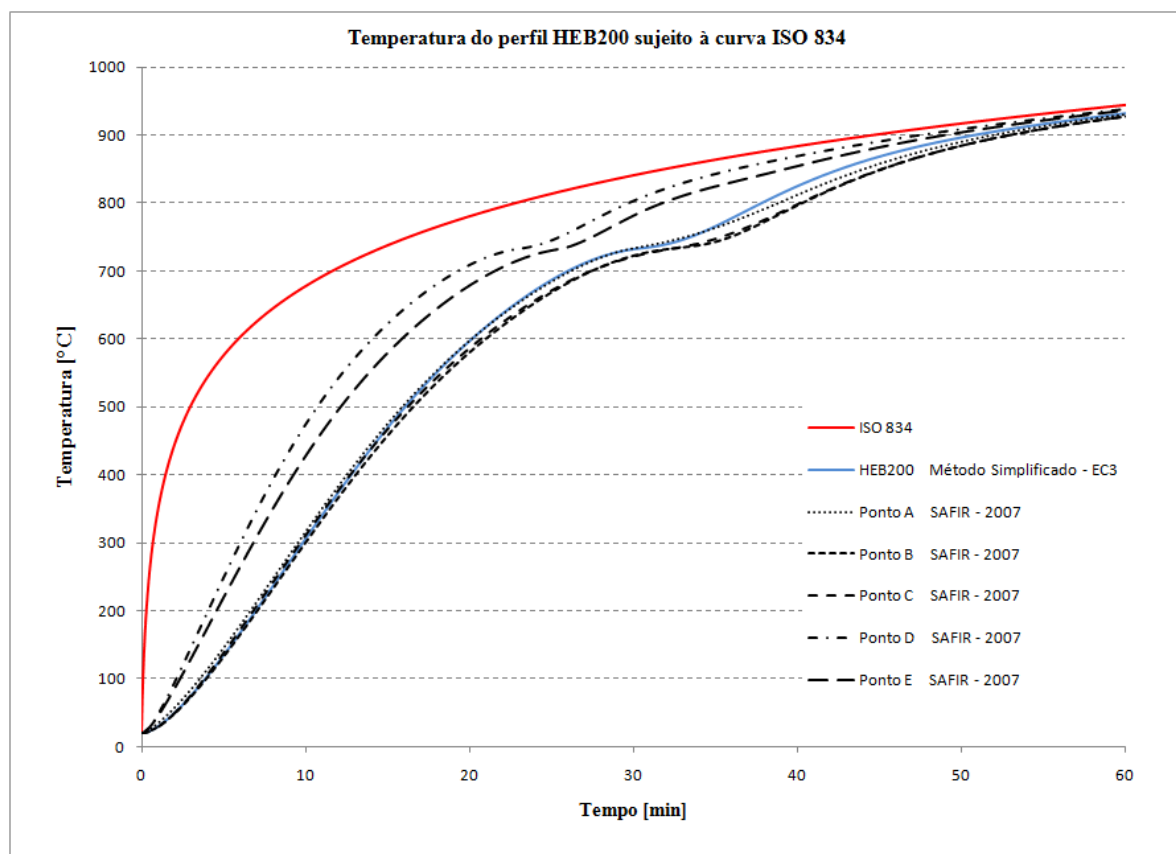


Figura 5.28 – Perfil HEB200 - Método Simplificado VS SAFIR

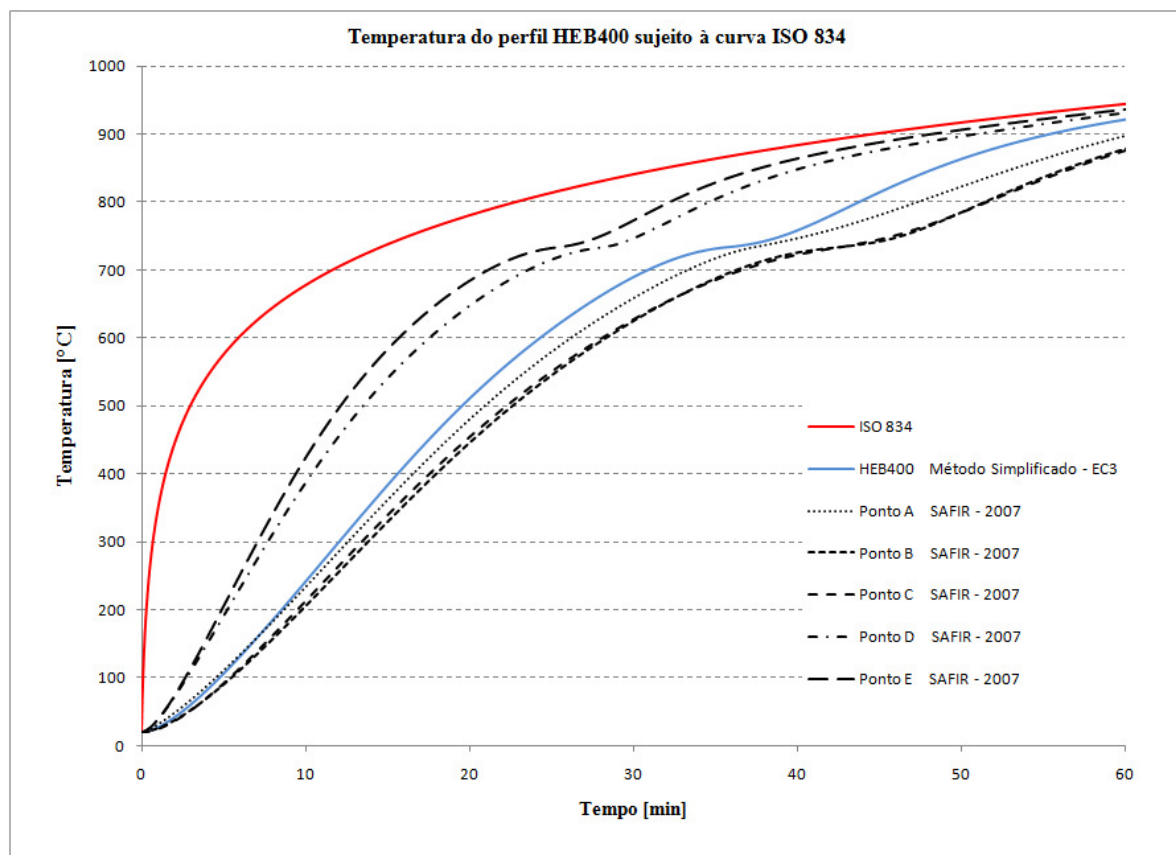


Figura 5.29 – Perfil HEB400 - Método Simplificado VS SAFIR



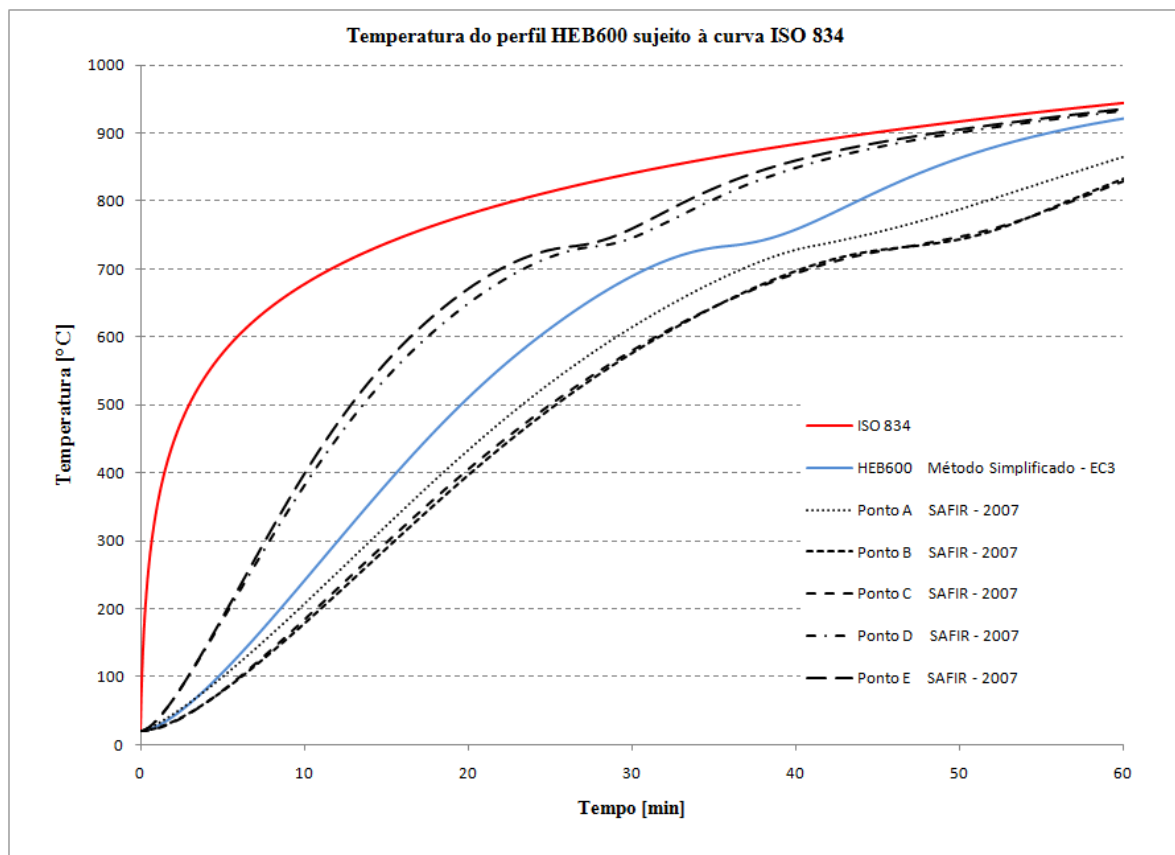


Figura 5.30 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR

Assiste-se neste caso a uma menor proximidade entre os resultados obtidos através do programa de cálculo automático SAFIR – 2007 e o resultado do Método Simplificado. Esta não concordância é mais evidente para perfis com menor factor de massividade.

É importante também salientar que os pontos D e E apresentaram poucas discrepâncias de temperatura, quando comparados com os resultados da modelação onde as quatro faces do perfil se encontravam expostas, o mesmo não aconteceu para os pontos A, B e C que sofreram um decréscimo na temperatura. Estas duas situações resultaram em diferenças significativas de temperaturas entre os pontos do perfil estudados, atingindo valores de 250 °C.

Também um decréscimo de temperatura foi verificado para os resultados produzidos pelo Método Simplificado quando comparados com a situação onde as quatro faces se encontravam expostas. Este decréscimo situa-se na ordem dos 50 °C.

Ainda que considerando todas as situações enunciadas anteriormente, de um modo geral pode-se afirmar que, para tempos de exposição superiores a 60 minutos, estas diferenças não são significativas

(ver Figura 5.32), levando a concluir-se que a aproximação obtida pelo Método Simplificado é aceitável.

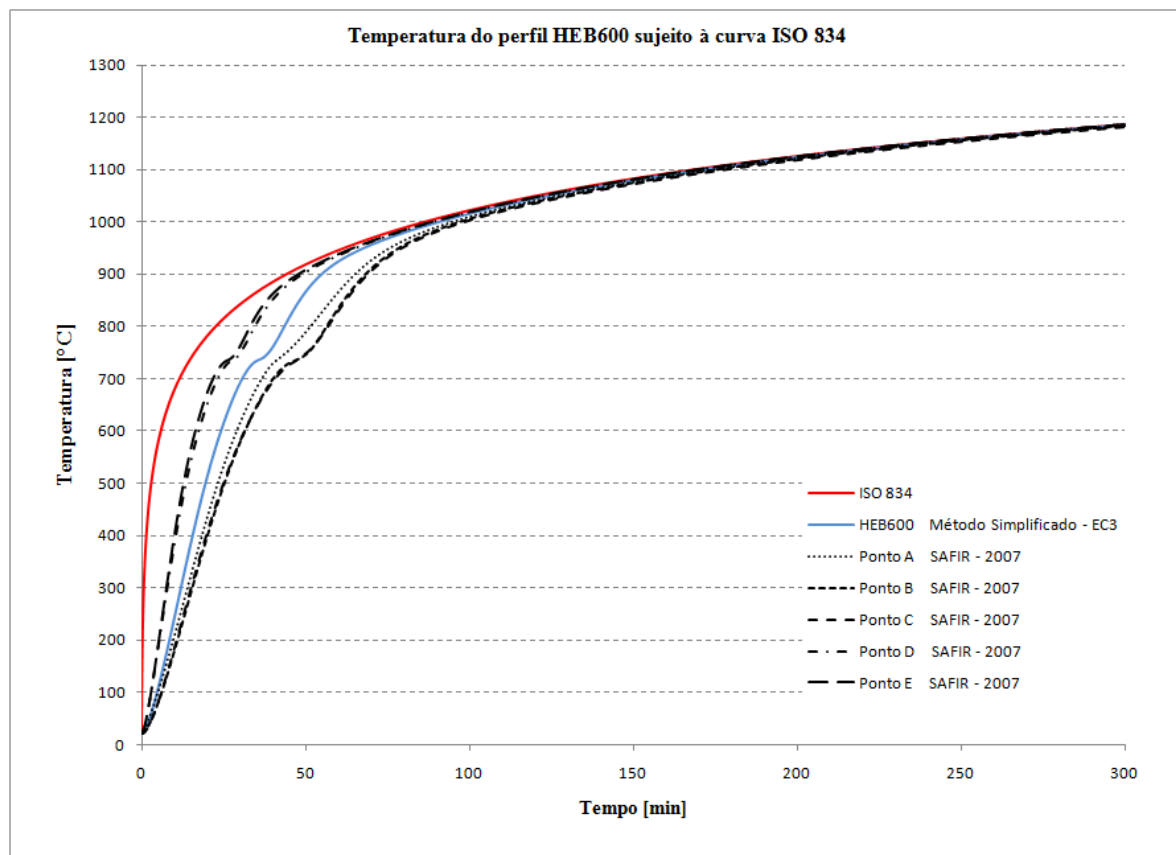


Figura 5.31 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR

Ainda considerando o perfil HEB600 com 3 faces sujeitas ao fogo, e de forma a se obterem resultados mais realistas, foi efectuada uma modelação deste perfil sob uma laje de betão com 200 mm (ver Figura 5.33), sendo deste modo contabilizadas as propriedades do betão na evolução da temperatura. A malha utilizada na modelação é apresentada na Figura 5.34.

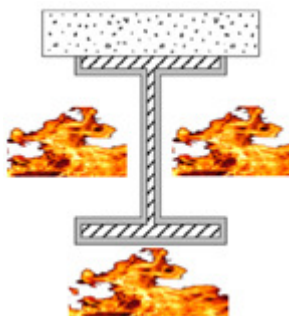


Figura 5.32 – Três faces expostas ao fogo

## Evolução da Temperatura em Elementos de Aço Sujeitos ao Fogo

### Evolução da Temperatura no Aço

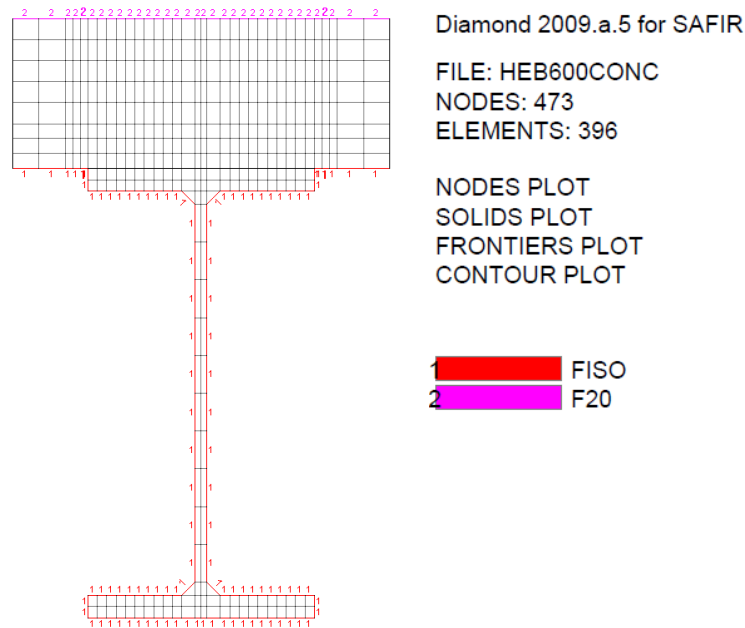


Figura 5.33 – Malha adoptada para perfil HEB600 sob laje de betão

Os resultados e respectiva comparação com o Método Simplificado são apresentados de seguida nas Figuras 5.35 e 5.36.

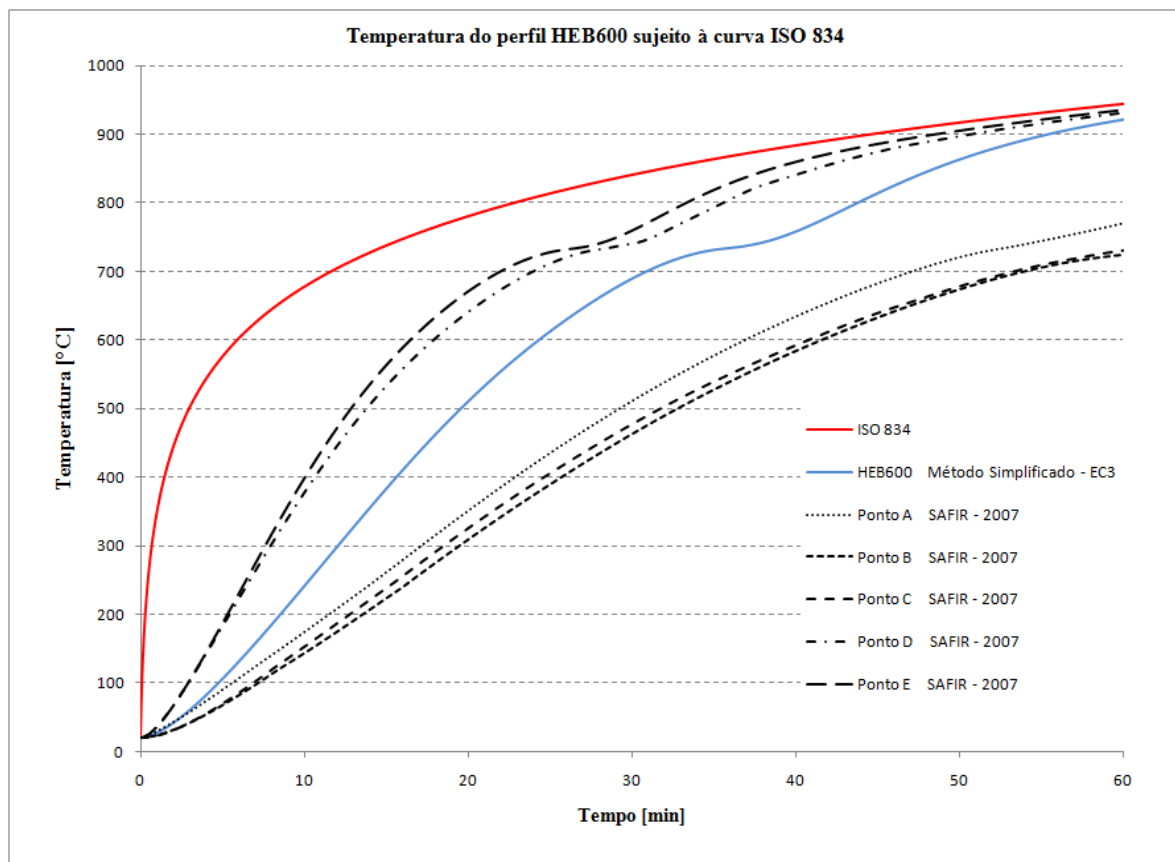


Figura 5.34 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR

Neste caso pode-se observar o aumento da discrepância entre os dois métodos, com particular importância para os pontos A, B e C, que, estando mais próximos da laje, são mais susceptíveis aos efeitos da mais baixa condutividade térmica do betão, diminuindo em cerca de 100 °C a sua temperatura relativamente à modelação sem a laje de betão.

Como era de se esperar, os Pontos D e E mantiveram-se nos mesmos valores, não sofrendo assim qualquer influência da laje de betão.

Mais uma vez, para tempos de exposição acima dos 60 minutos como a Figura 5.36 demonstra, as diferenças entre os dois métodos são atenuadas, ainda que neste caso o método simplificado assuma pela primeira vez uma posição conservativa.

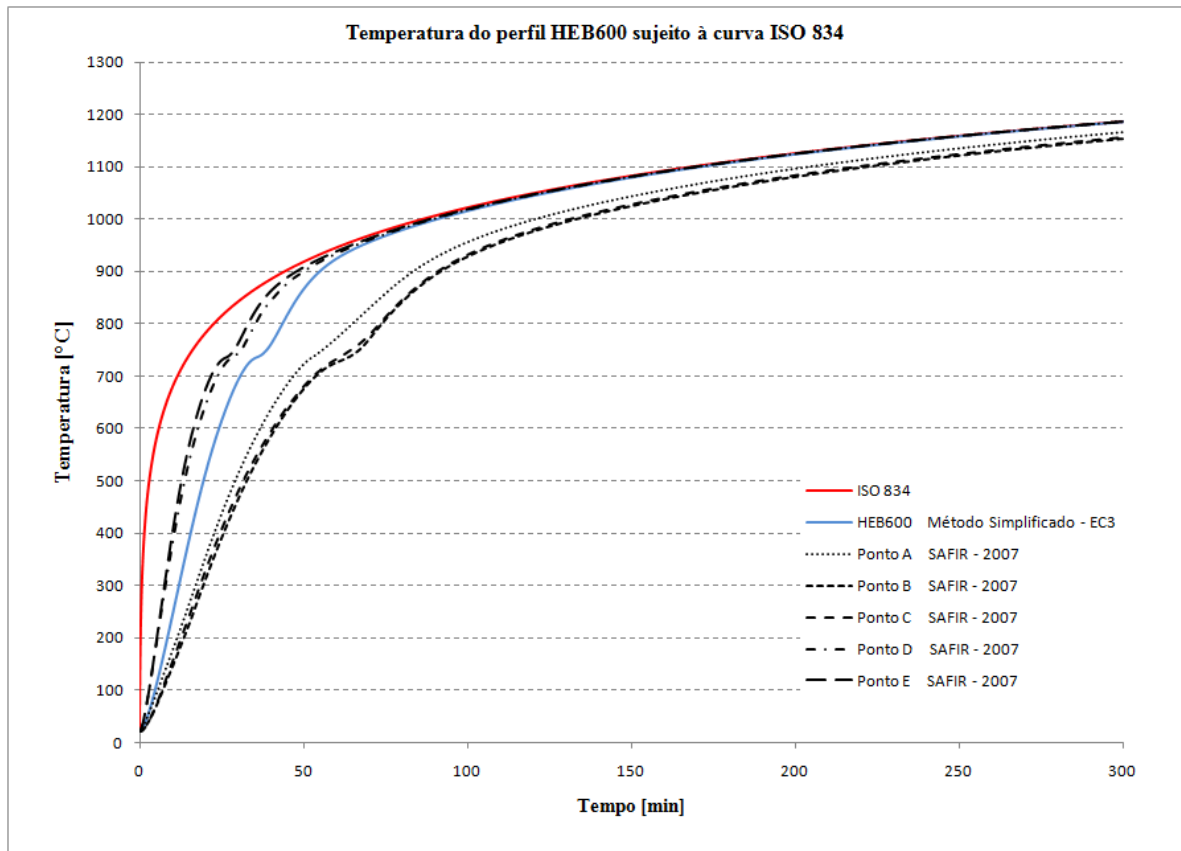


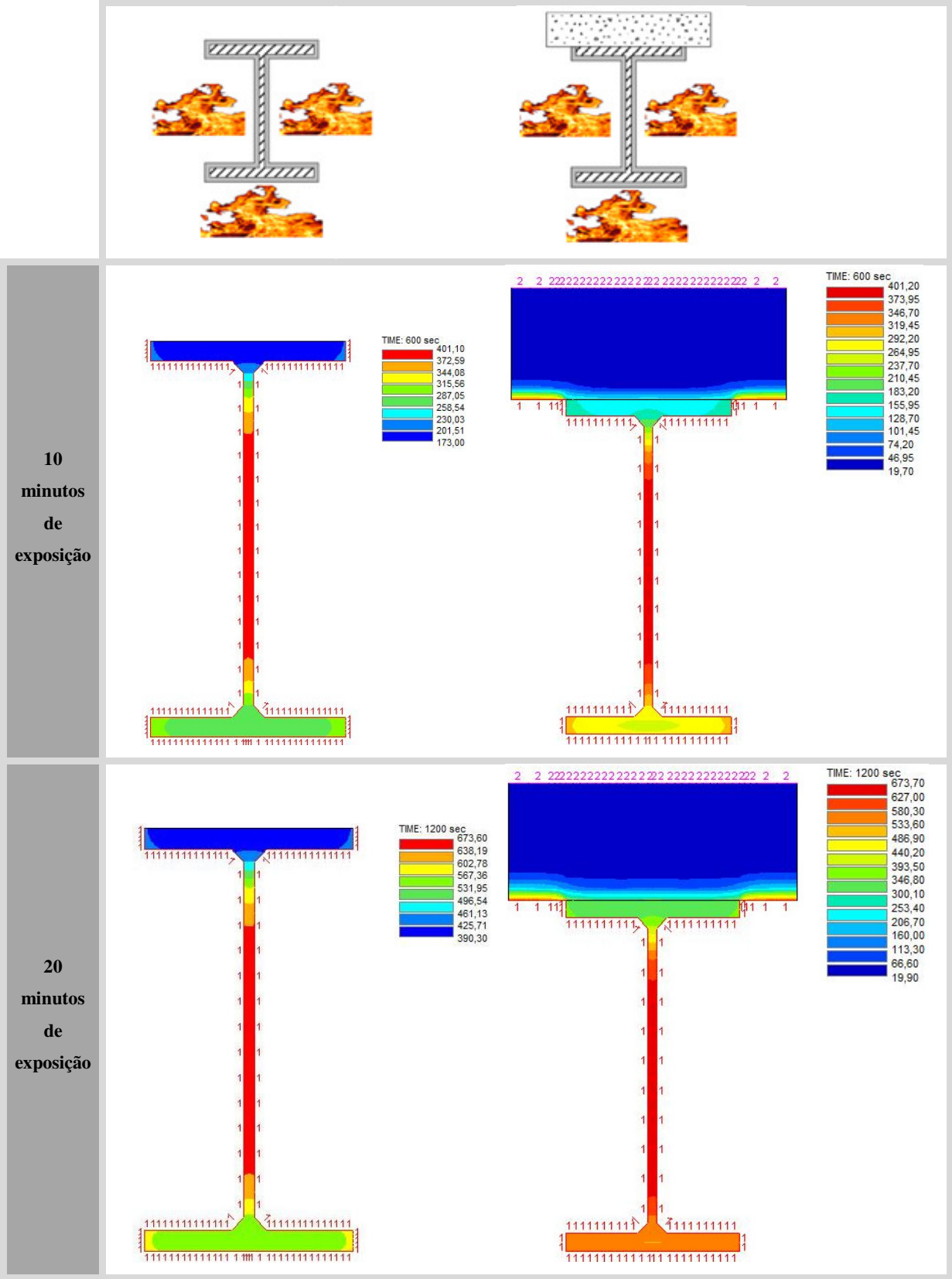
Figura 5.35 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR

Como síntese, é apresentada na Tabela 5.6 uma comparação entre a modelação do HEB600 com e sem laje de betão. Os diagramas de temperaturas apresentados foram extraídos utilizando o programa de pós-processamento DIAMOND – 2009.

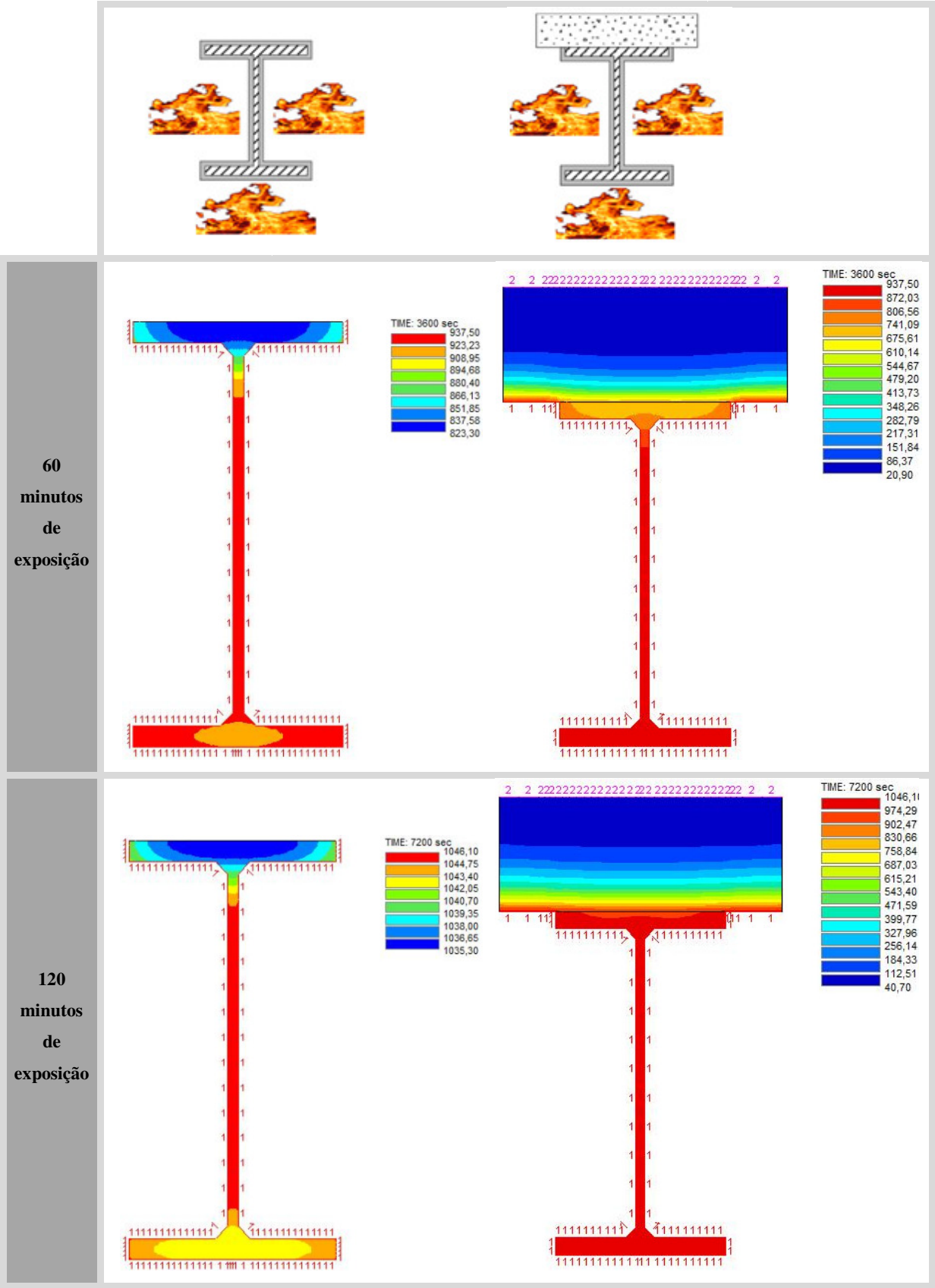
Evolução da Temperatura em Elementos de Aço Sujeitos ao Fogo

Evolução da Temperatura no Aço

Tabela 5.6 – Comparação da evolução da temperatura para perfil HEB600



Comparação da evolução da temperatura para perfil HEB600 (continuação)



De seguida, apresentam-se os resultados da modelação dos perfis IPE com apenas 3 faces sujeitas ao incêndio e a respectiva comparação com o método simplificado preconizado no Eurocódigo 3, Parte 1.2. (ver Figuras 5.37 a 5.40).

A Tabela 5.7 apresenta os correspondentes factores de massividade para os perfis IPE estudados.

Tabela 5.7 - Factor de massividade  $A_m / V$  para perfis IPE não protegidos – 3 faces expostas ao fogo

	IPE100	IPE200	IPE400	IPE600
$A_m / V$	334.0	234.6	152.3	115.1

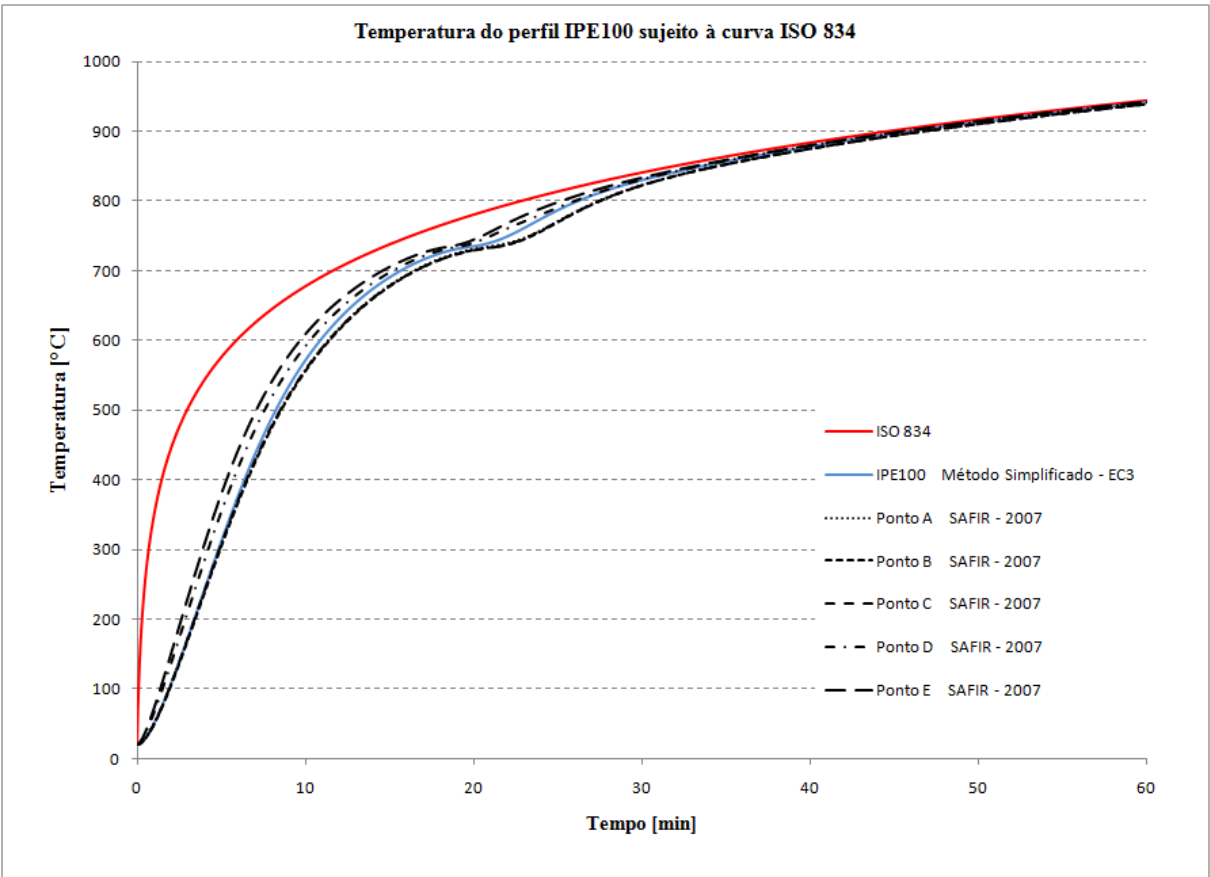


Figura 5.36 – Perfil IPE100 - Método Simplificado VS SAFIR

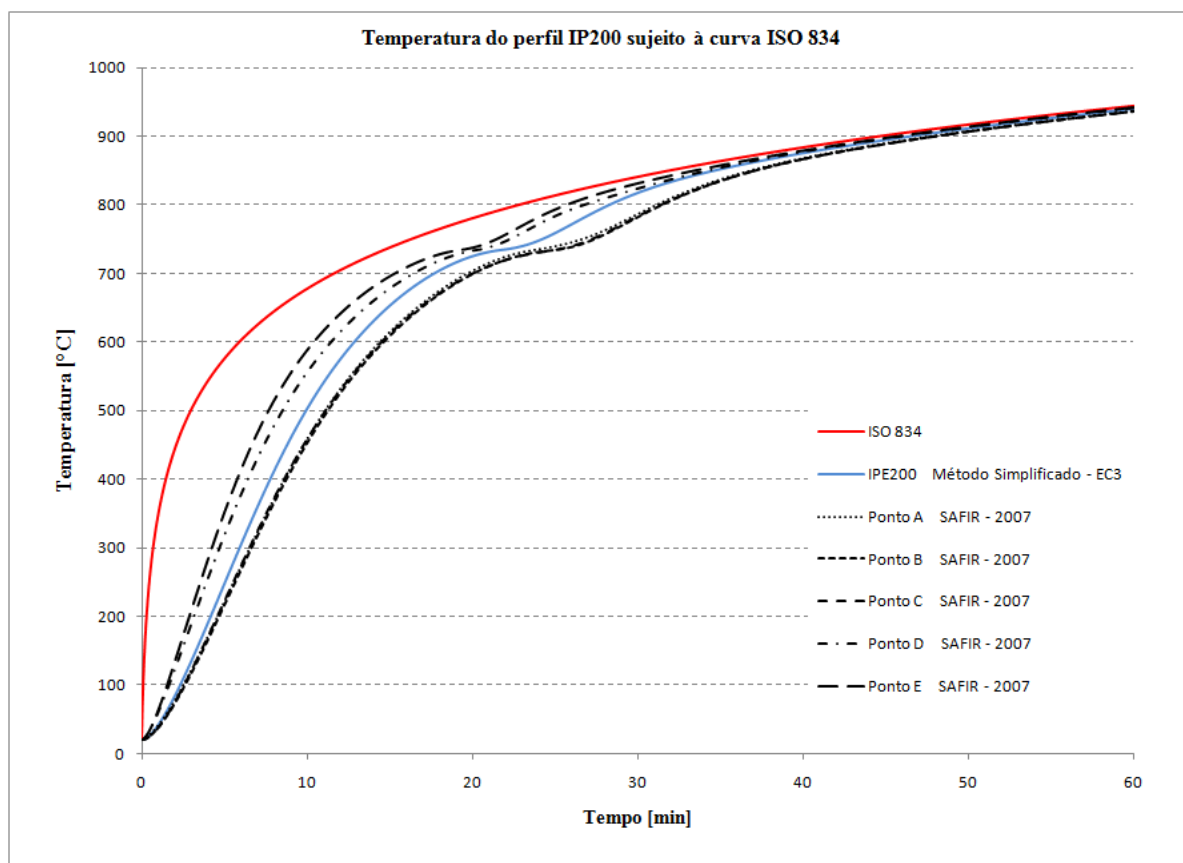


Figura 5.37 – Perfil IPE200 - Método Simplificado VS SAFIR

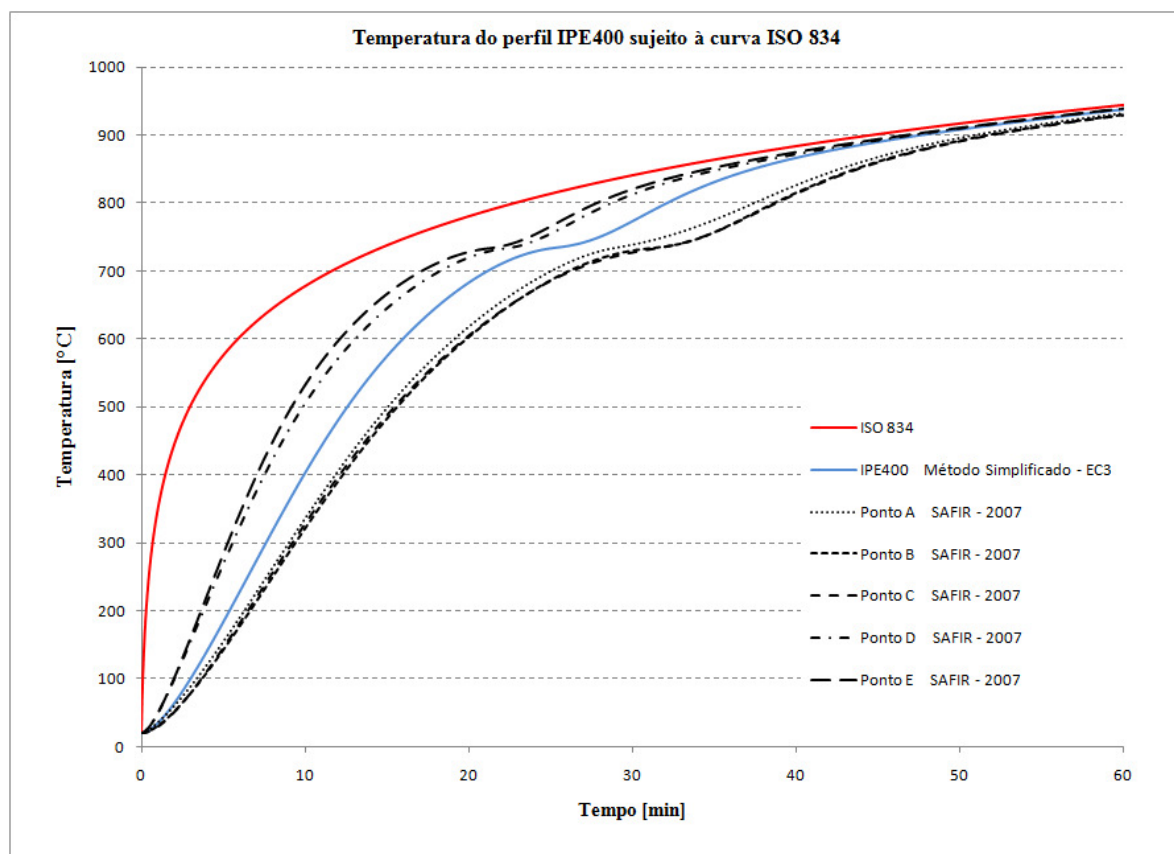


Figura 5.38 – Perfil IPE400 - Método Simplificado VS SAFIR



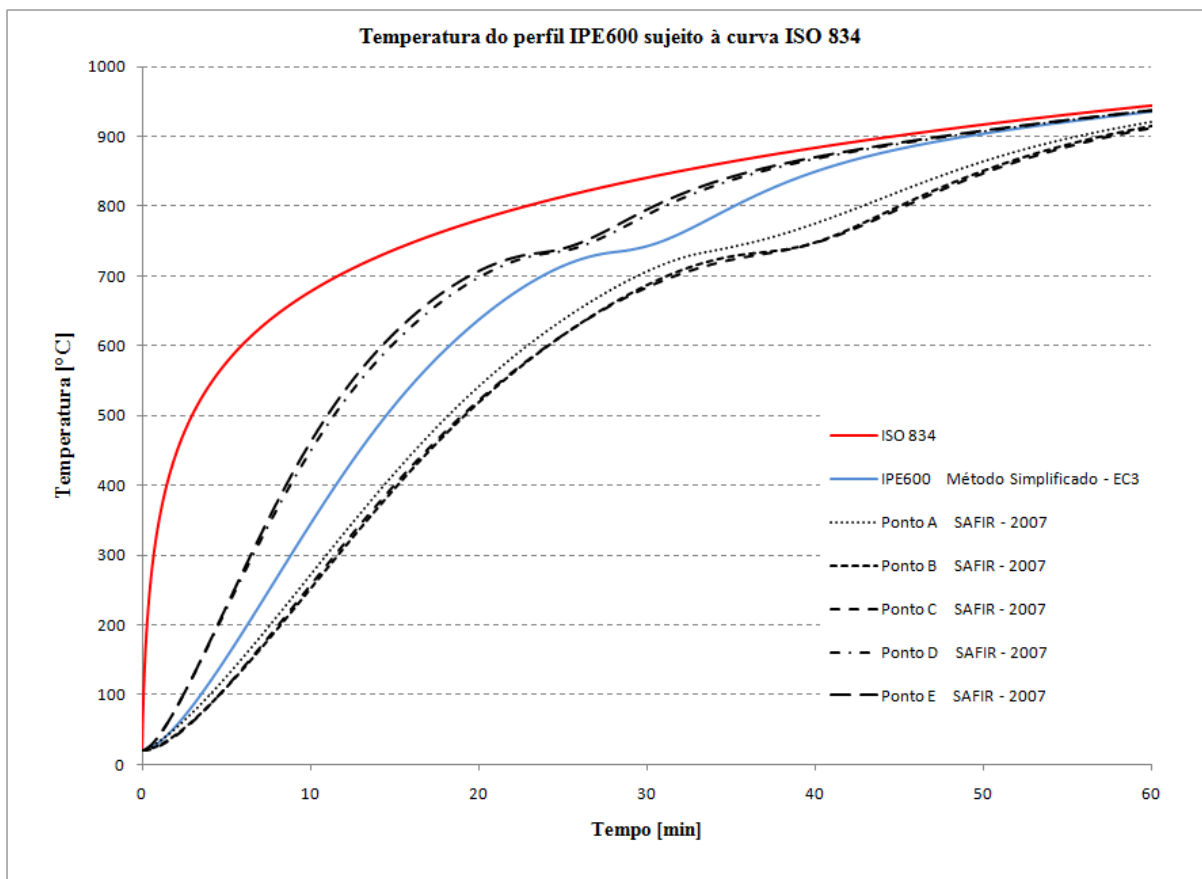
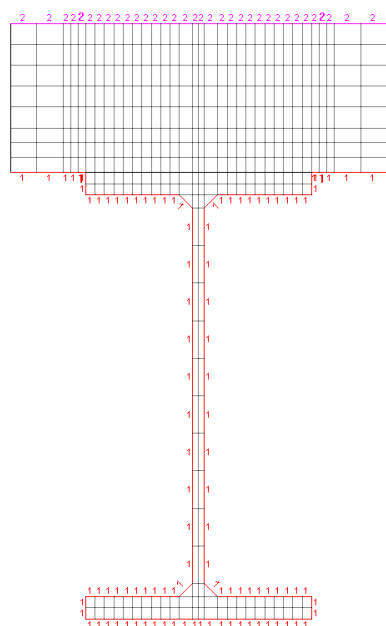


Figura 5.39 – Perfil IPE600 - Método Simplificado VS SAFIR

A semelhança da modelação para o perfil HEB sujeito as mesmas acções térmicas, os resultados dos dois métodos estudados sofrem um aumento das discrepâncias quando comparados com os resultados da modelação onde as quatro faces foram sujeitas ao incêndio. Ainda que não sejam tão significativas como nos perfis HEB, fruto das menores espessuras dos banzos e almas, tais diferenças podem-se claramente observar para tempos de exposição até 60 minutos.

Pode-se afirmar que, para esta modelação, o Método Simplificado equivale a uma média ponderada dos pontos em estudo no perfil.

A fim de se verificar as implicações da utilização do Método Simplificado num modelo mais realista, foi modelado também um perfil IPE600 sob uma laje de betão com 200 mm de espessura, como a Figura 5.41 demonstra. Os resultados e respectiva comparação apresentam-se nas Figuras 5.42 e 5.43.



Diamond 2009.a.5 for SAFIR

FILE: IPE600CONC

NODES: 473

ELEMENTS: 396

NODES PLOT

SOLIDS PLOT

FRONTIERS PLOT

CONTOUR PLOT

1 FISO  
2 F20

Figura 5.40 – Malha adoptada para perfil IPE600 sob uma laje de betão

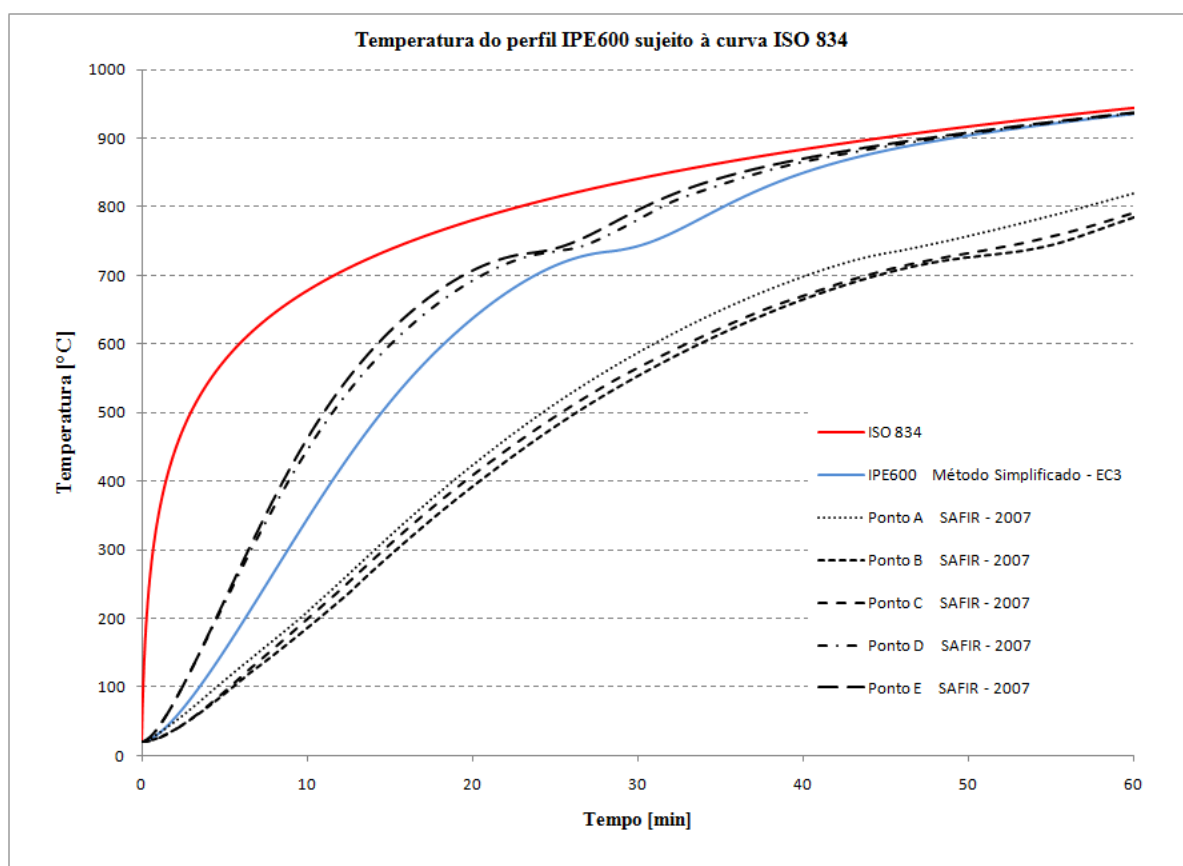


Figura 5.41 – Perfil IPE600 - Método Simplificado VS SAFIR

Os resultados foram em tudo semelhantes ao perfil IPE600 analisado anteriormente. Contudo, os pontos A, B e C sofreram um decréscimo na sua temperatura, mais uma vez fruto da interação com a laje de betão.

Foram ainda modelados três diferentes perfis circulares. Para tais perfis o Eurocódigo 3, Parte 1.2, utiliza no cálculo do factor de massividade uma simplificação descrita pela Equação 5.23:


$$A_m/V = \frac{1}{t} \quad (5.23)$$

onde,

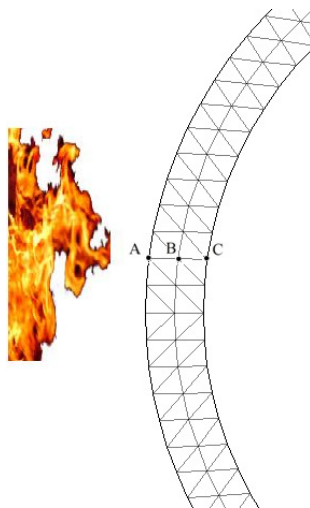
t espessura do perfil [m]

Para esta análise foram modelados os perfis CHS descritos na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8 - Dimensões e factor de massividade  $A_m / V$  para perfis CHS não protegidos**

	CHS114x5	CHS244.5x16	CHS508x16	
<b>b[mm]</b>	114	244.5	508	
<b>t[mm]</b>	5	16	16	
<b><math>A_m/V</math> [m<sup>-1</sup>]</b>	200(209.2)	62.5(66.9)	62.5(64.5)	

A malha utilizada é representada na Figura 5.8(b), sendo considerados para análise de resultados os pontos A, B e C como descrito na Figura 5.43.



**Figura 5.42 – Pontos utilizados para comparação de resultados**

De seguida é apresentada a evolução da temperatura para os diferentes perfis circulares e a respectiva comparação entre o método simplificado descrito no Eurocódigo 3, Parte 1.2 e o programa de cálculo automático SAFIR – 2007.

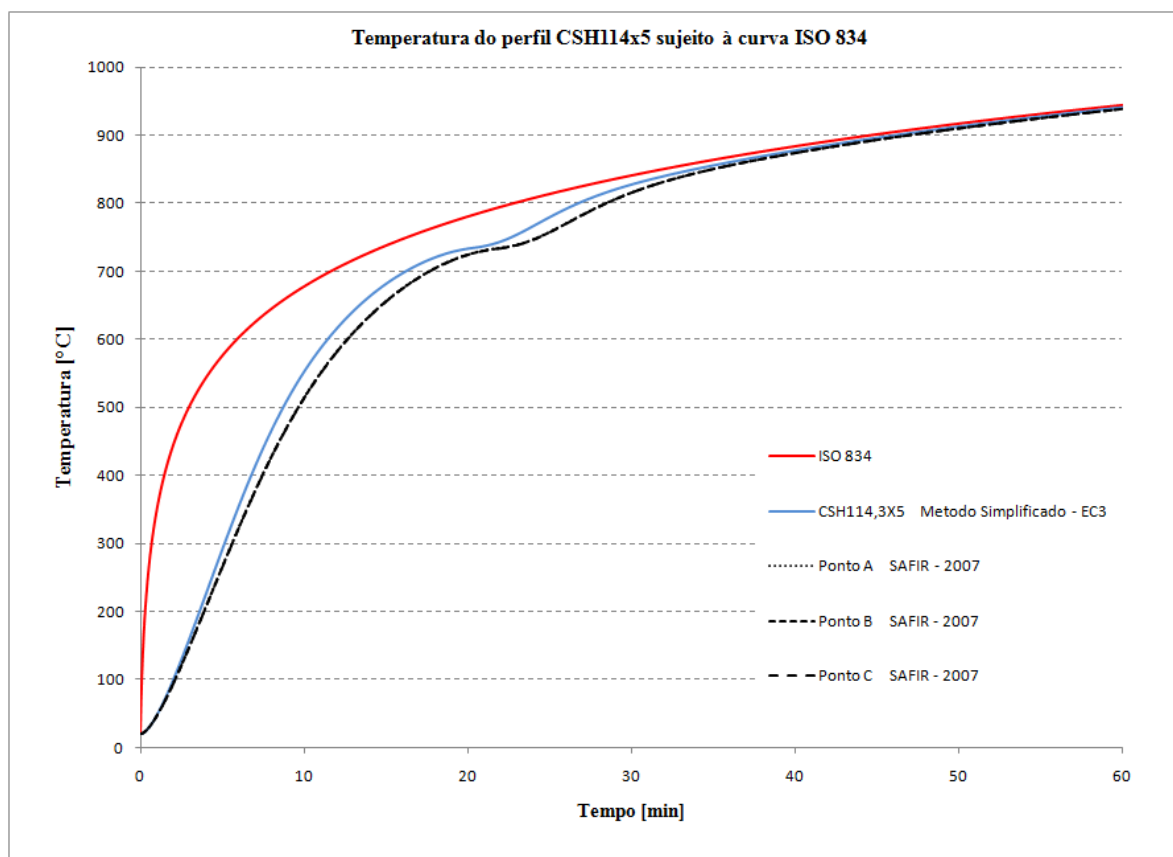


Figura 5.43 – Perfil CHS144x5 - Método Simplificado VS SAFIR

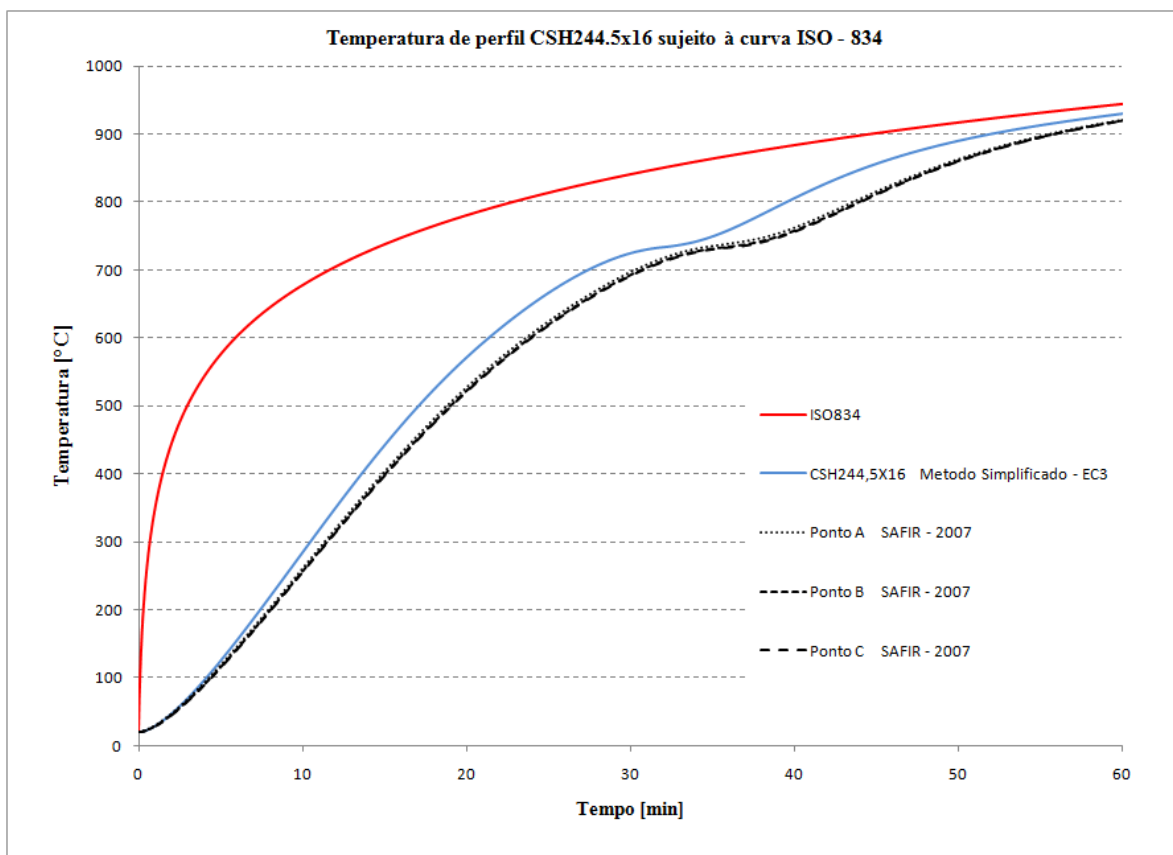


Figura 5.44 – Perfil CHS244x16 - Método Simplificado VS SAFIR

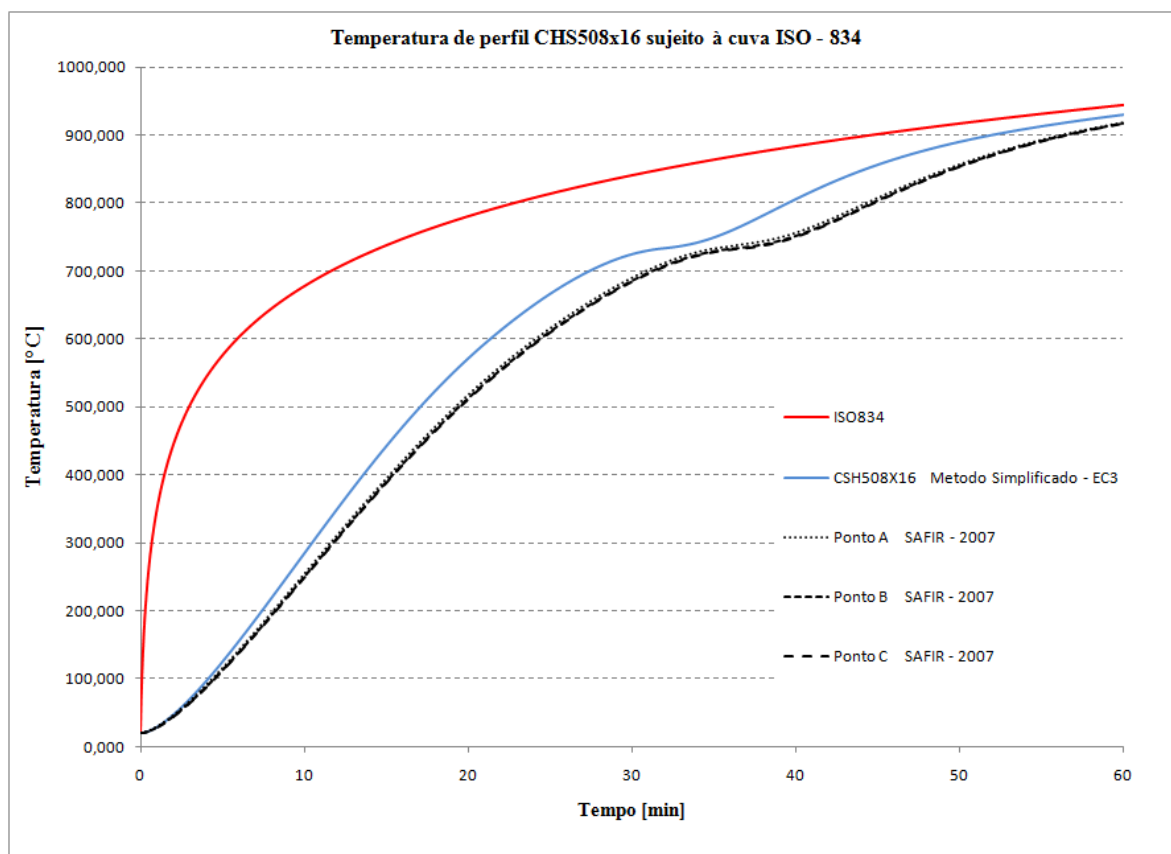


Figura 5.45 – Perfil CHS508x16 - Método Simplificado VS SAFIR

É visível nas Figuras 5.44 a 5.46, que os dados do programa de cálculo automático SAFIR – 2007 para os três pontos considerados são quase coincidentes. Tal deve-se à diminuta espessura do perfil, aliado à elevada condutividade térmica do aço.

No respeitante à comparação com o método simplificado, assiste-se à melhor convergência de resultados de todas as modelações realizadas. Pode-se assim afirmar que a fórmula do factor de massividade para os perfis circulares, constitui uma boa aproximação.

Deste modo foram apresentados os resultados obtidos quer através de modelações mais complexas quer através da utilização de formulações simplificada para perfis não protegidos. De uma forma geral, verifica-se concordância entre os valores retirados do Método Simplificado e os do programa de cálculo automático.

No Anexo II são apresentados dois ábacos para o cálculo da temperatura de perfis não protegidos exposto a curva de incêndio ISO 834.

No próximo ponto, são analisados alguns tipos de perfis dotados de protecção ao incêndio, com diferentes tipos de materiais e de sistemas de protecção.

### 5.2.3. Elementos protegidos

Para serem cumpridos todos os requisitos relativos à resistência ao fogo em estruturas de aço, é por vezes necessário recorrer-se à protecção dos elementos estruturais. Para este efeito utilizam-se materiais isolantes termicamente com variadas disposições, como se ilustra na Figura 5.47.

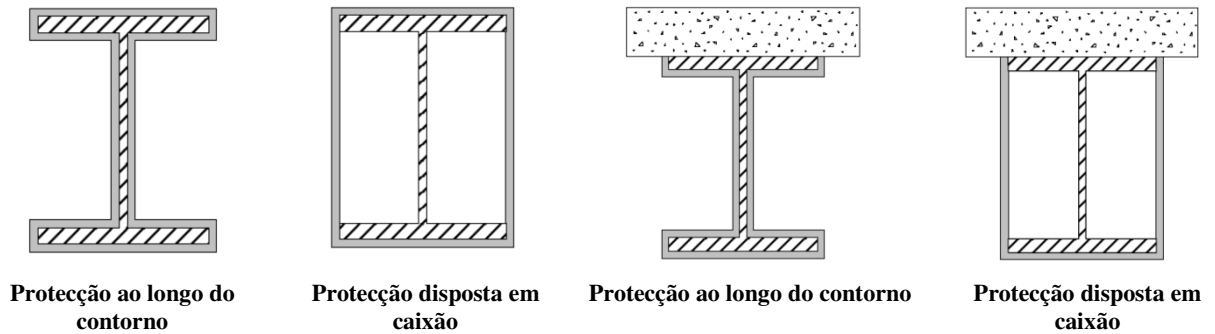


Figura 5.46 – Processos distintos de aplicação de protecção ao fogo [Fonte: RIBEIRO (2004)]

A gama de materiais de isolamento é muito variada, apresentando-se a título exemplificativo na Tabela 4.1 alguns destes materiais, assim como dados típicos relativos às suas propriedades térmicas. Tais dados podem ser utilizados quando não se dispuser de informação mais completa sobre os mesmos.

Segundo VILA REAL (2003), os valores que constam na Tabela 4.1 para a condutividade térmica,  $\lambda_p$ , reportam-se a materiais de protecção secos, sendo que a existência de humidade no material de protecção reflecte-se num atraso  $t_v$  imediato na evolução da temperatura no aço após este atingir 100 °C, atraso este que tem como consequência directa um aumento da resistência ao incêndio.

Segundo este mesmo autor, após se atingirem dos 100 °C na presença de materiais de protecção húmidos, o aumento de temperatura subsequente é utilizado na evaporação da humidade livre presente nestes materiais (calor latente de evaporação), causando dessa forma o atraso na evolução da temperatura  $t_v$  [minutos] do aço, representado na Figura 5.48.

Este atraso é regido pela Equação 5.24, presente na ENV13381-4:

$$t_v = \frac{p\rho_p d_p^2}{5\lambda_p} \quad (5.24)$$

onde,

$d_p$  espessura da protecção [m];

$p$  teor de humidade [%];

$\rho_p$  densidade do material de protecção [Kg/m<sup>3</sup>];

$\lambda_p$  condutividade térmica do material de protecção [W/mK].

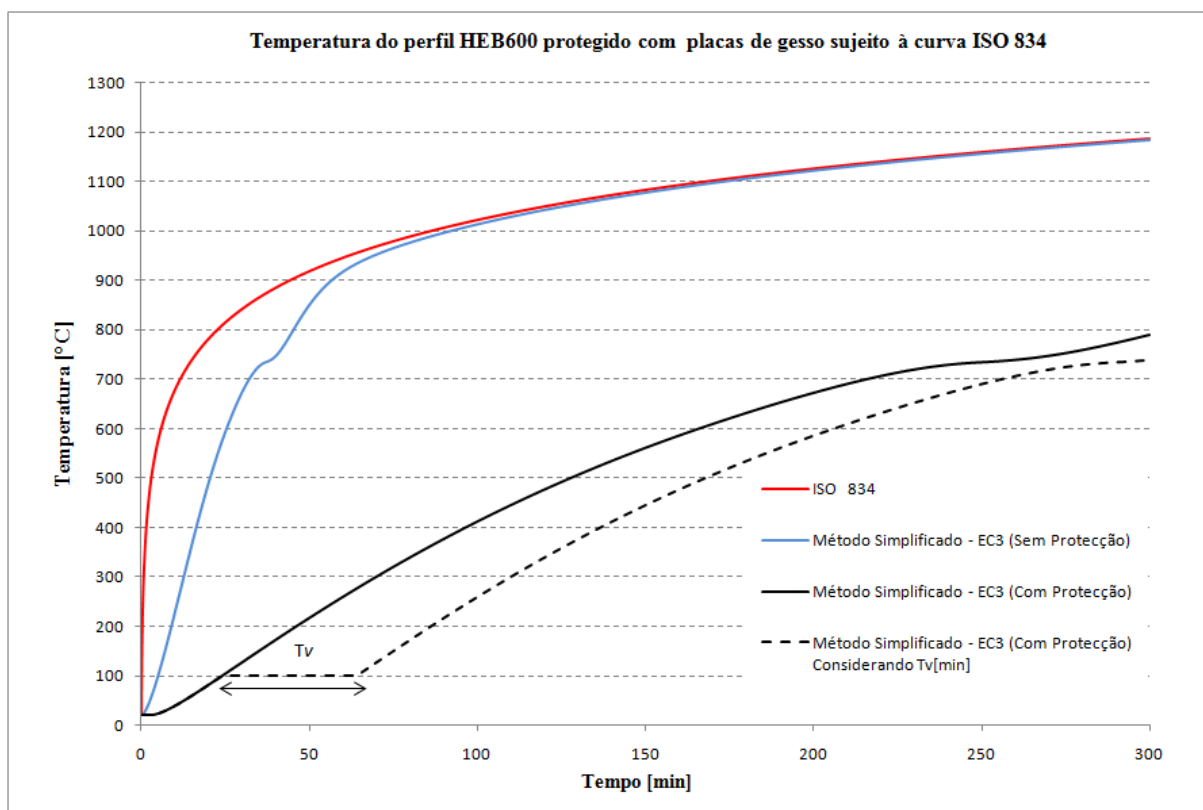


Figura 5.47 – Efeito da consideração de humidade no material de protecção

De acordo com o Eurocódigo 3, para uma distribuição de temperatura uniforme numa secção transversal, o aumento de temperatura,  $\Delta\theta_{a,t}$ , de um elemento de aço isolado durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  deverá ser determinado a partir da seguinte Equação 5.25:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \frac{\phi}{3})} \Delta t - \left( e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \Delta\theta_{g,t} \quad (\text{mas } \Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ se } \Delta\theta_{g,t} > 0) \quad (5.25)$$

com:

$$\phi = \frac{c_p d_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot \frac{A_p}{V} \quad (5.26)$$

onde,

$\Delta\theta_{g,t}$  variação da temperatura ambiente dos gases durante o intervalo de tempo  $\Delta t$  [°C];

$\lambda_p$  condutibilidade térmica do sistema de protecção contra incêndio [W/mK];

$\frac{A_p}{V}$  factor de massividade do perfil protegido [m<sup>-1</sup>];

$A_p$	área da superfície interior da protecção, correspondente á superfície de exposição ao incêndio por unidade de comprimento[m <sup>2</sup> /m];
$V$	volume do perfil por unidade de comprimento [m <sup>3</sup> /m];
$c_a$	calor específico do aço dependente da temperatura [J/KgK];
$c_p$	calor específico do material de protecção contra incêndio, independente da temperatura [J/KgK];
$d_p$	espessura do material de protecção contra incêndio [m];
$\Delta t$	intervalo de tempo ( $\leq 30s$ ) [s];
$\theta_{a,t}$	temperatura do aço, no instante $t$ [°C];
$\theta_{g,t}$	temperatura ambiente dos gases no instante $t$ [°C];
$\lambda_p$	condutibilidade térmica do sistema de protecção contra incêndio [W/mK];
$\rho_a$	massa específica do aço [Kg/m <sup>3</sup> ];
$\rho_p$	massa específica do material de protecção contra incêndio [Kg/m <sup>3</sup> ].

Qualquer valor negativo de variação da temperatura,  $\Delta\theta_{a,t}$ , obtido pela Equação 5.25, deve ser substituído por zero.

A Equação 5.25 foi resolvida utilizando diferentes intervalos de tempo, de modo a se escolher o intervalo que conduziria a menores erros no cálculo.

Sabendo que se deve respeitar a condição  $\Delta t \leq 30$  s, tomou-se  $\Delta t = 1$  s como passo mínimo e estudou-se  $\Delta t = 5$  s ,  $\Delta t = 10$  s ,  $\Delta t = 20$  s e  $\Delta t = 30$  s, apresentando-se na Figura 5.49 os resultados em percentagem do erro em relação a  $\Delta t = 1$  s. Para este efeito foi considerado um perfil HEB600, protegido em caixão por placas de gesso com 2.3 cm de espessura e sujeito à curva de incêndio padrão, ISO 834.

Também para esta situação optou-se por considerar ainda para  $\Delta t = 50$  s e  $\Delta t = 100$  s (apesar destes intervalos serem superiores ao limite preconizado no Eurocódigo 3), de modo a compreender as razões desta imposição.



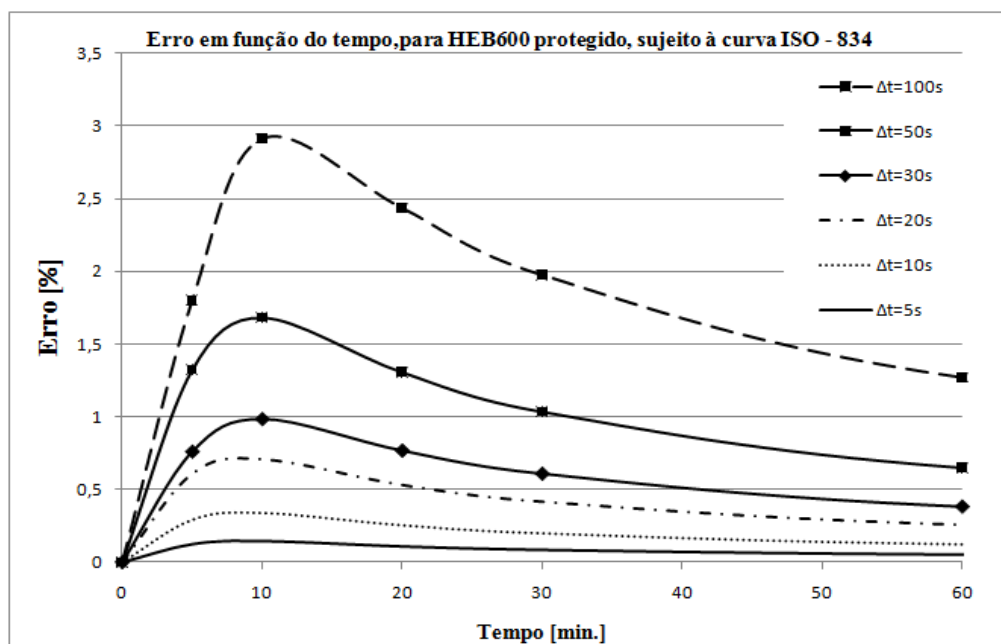


Figura 5.48 - Erro em função do tempo, para HEB600 sujeito à curva ISO - 834

É visível na Figura 5.49 que o cálculo da evolução da temperatura utilizando o Método Simplificado preconizado no Eurocódigo 3, Parte 1.2 é neste caso um pouco mais sensível à variação de  $\Delta t$ , conduzindo ainda assim na pior situação a um erro aproximadamente 1,0 %. Sendo assim, decidiu-se utilizar  $\Delta t = 1$  s, de forma a minimizar os erros inerentes ao Método Simplificado.

De seguida apresenta-se a evolução da temperatura comparando o programa de cálculo automático SAFIR – 2007 com o Método Simplificado para três perfis tipo HEB, utilizando como material de protecção fibra mineral no contorno, não considerando os efeitos da humidade presente no material e o correspondente atraso na evolução da temperatura no perfil. Inicialmente foram consideradas as condições de exposição representadas na Figura 5.50.

A malha utilizada para esta modelação foi criada no programa SAFIRWIZARD, e é apresentada na Figura 5.51. Os pontos estudados é representada na Figura 5.1.

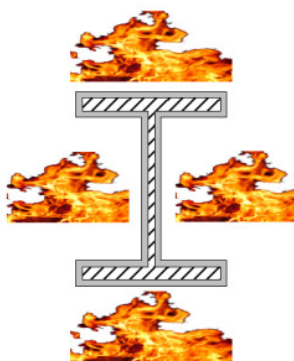


Figura 5.49 – Quatro faces expostas ao fogo

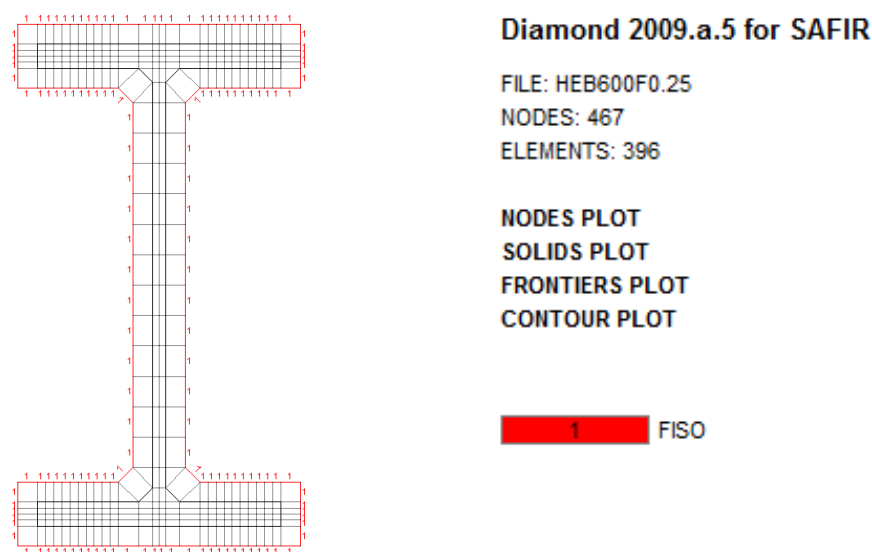


Figura 5.50 – Malha adoptada para perfil HEB600 protegido com fibra mineral no contorno

As Figuras 5.52 a 5.54 apresentam os resultados obtidos para os perfis HEB estudados, protegidos no contorno por fibra mineral com 0.025 [m] de espessura e com as propriedades indicadas na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Propriedades térmicas para da fibra mineral [Fonte: VILA REAL (2003)]

	Densidade $\rho_p [\text{Kg/m}^3]$	Teor de humidade $p \%$	Condutividade térmica $\lambda_p [\text{W/mK}]$	Calor específico $C_p [\text{J/KgK}]$
<b>Fibra Mineral</b>	350	1.00	0.12	1200

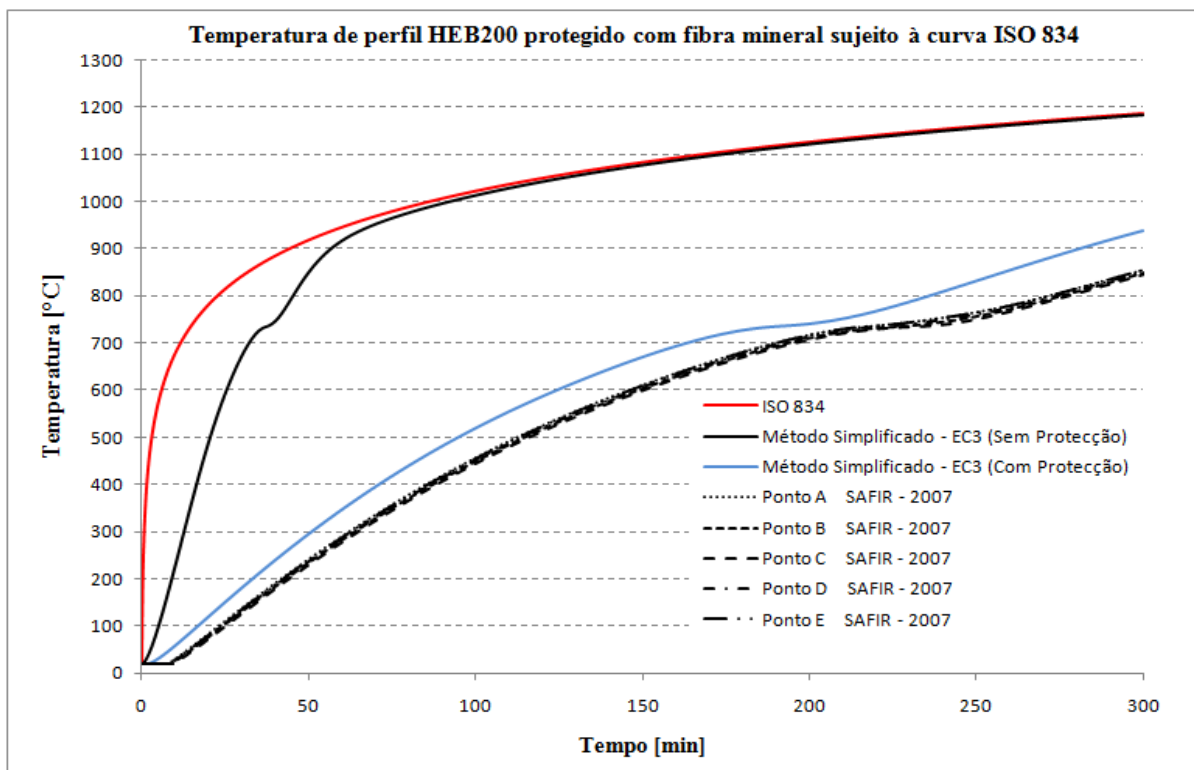


Figura 5.51 – Perfil HEB200 - Método Simplificado VS SAFIR

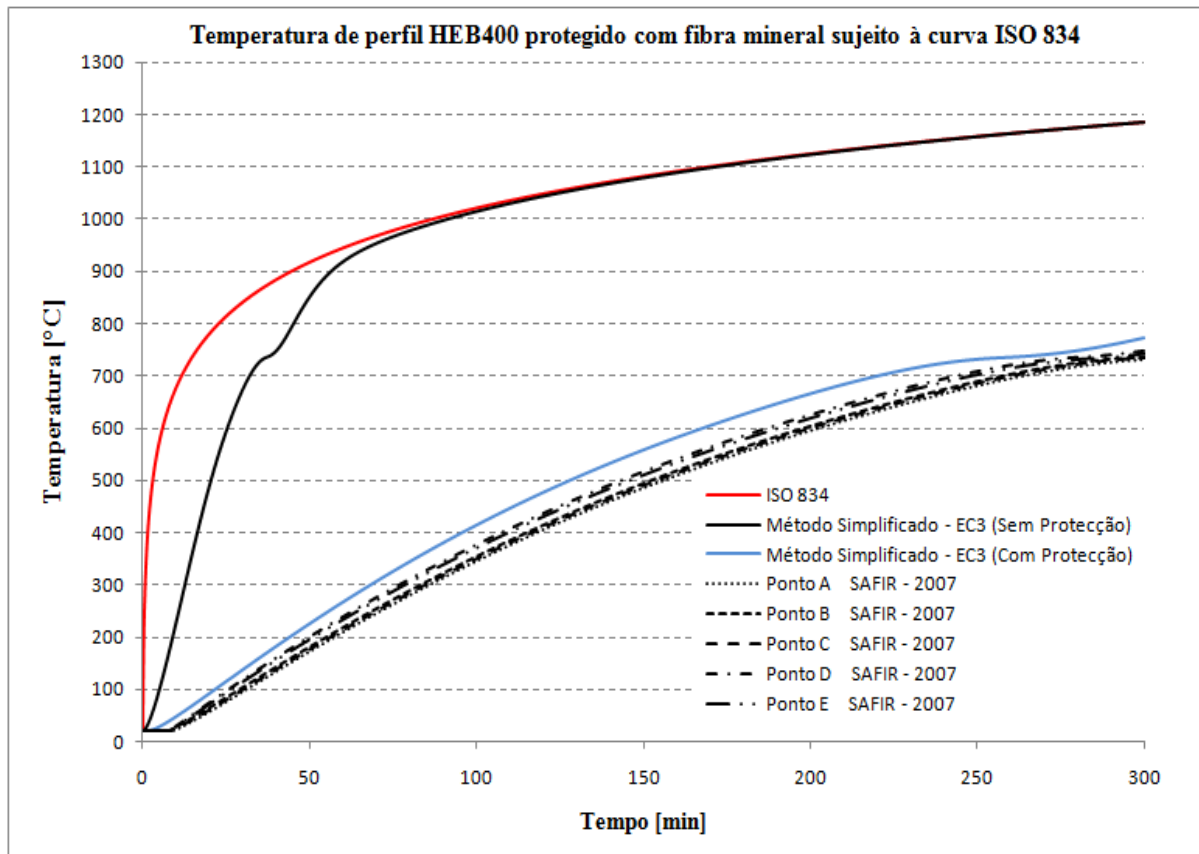


Figura 5.52 – Perfil HEB400 - Método Simplificado VS SAFIR

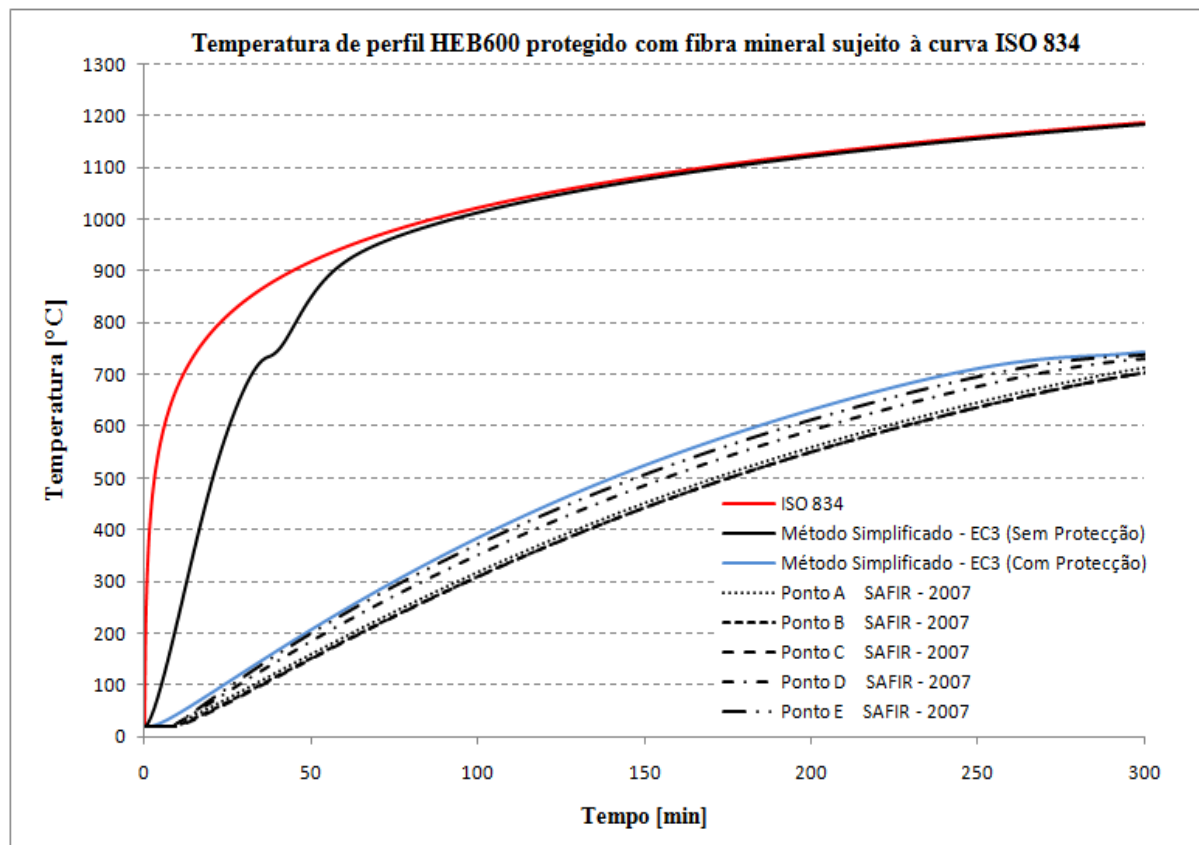


Figura 5.53 – Perfil HEB600 - Método Simplificado VS SAFIR

É bem visível a excelente concordância entre os resultados produzidos pelo Método Simplificado e os obtidos pelo programa de cálculo automático SAFIR – 2007.

É de referir também o posicionamento conservativo que o Método Simplificado adopta comparativamente com os resultados extraídos do programa de cálculo automático.

Como visto anteriormente para os perfis não protegidos, o caso onde ocorriam os resultados mais dispares era a situação onde a face não exposta se encontrava em contacto com uma laje de betão, sendo por este facto esta a única considerada neste ponto, como se representa na Figura 5.55. A malha utilizada encontra-se representada na Figura 5.56.

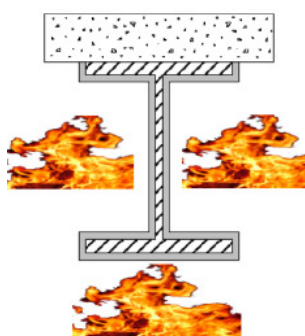


Figura 5.54 – Três faces expostas ao fogo

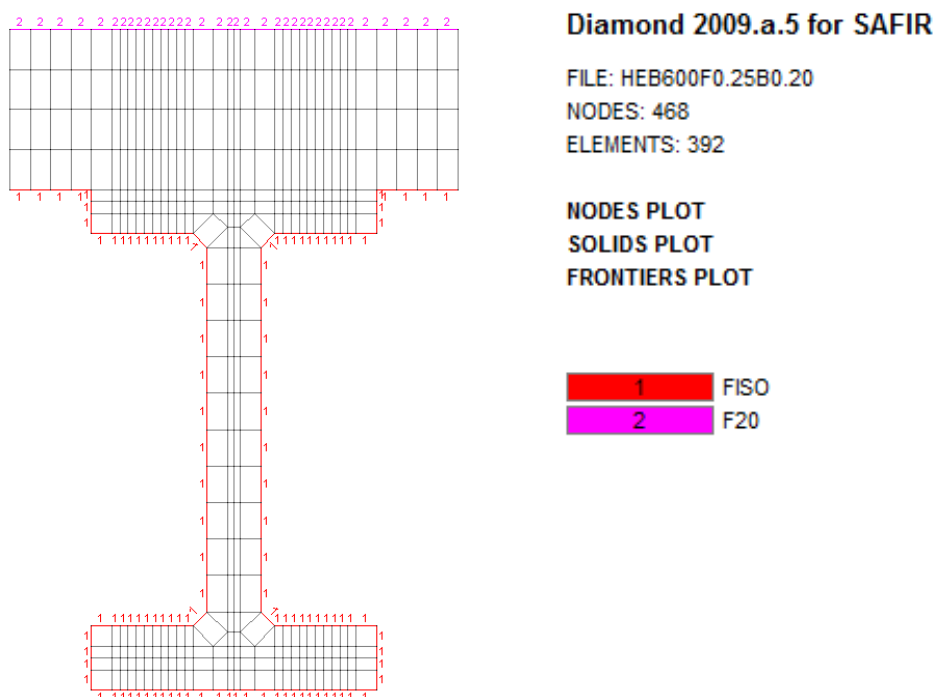


Figura 5.55 – Malha adoptada para perfil HEB600 protegido com fibra mineral no contorno, sob uma laje de betão

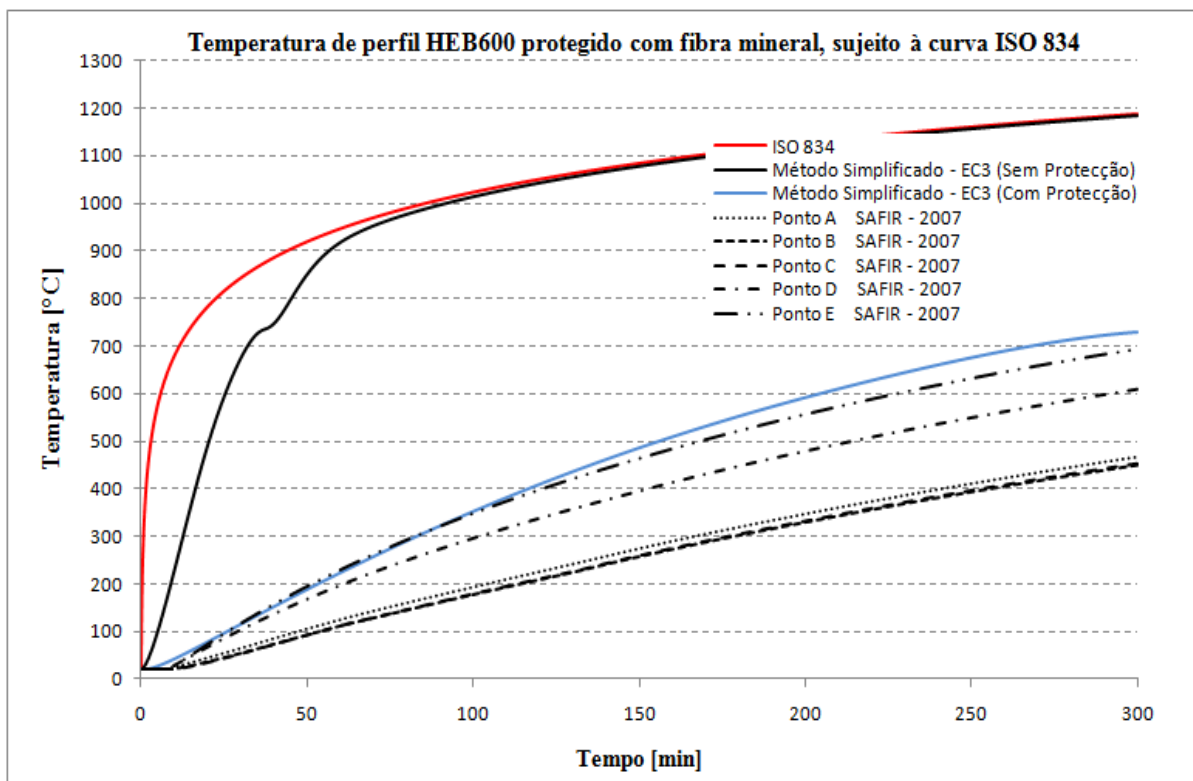


Figura 5.56 – Perfil IPE600 - Método Simplificado VS SAFIR

Os resultados apresentados na Figura 5.57, apenas reportam diferenças significativas para os pontos A, B e C, ponto estes sob a influência directa da baixa condutividade térmica da laje de betão em contacto com o perfil. Note-se que esta situação não é contabilizada directamente através do Método Simplificado preconizado pelo Eurocódigo 3.

O Método Simplificado toma sempre para os perfis protegidos modelados, uma posição conservativa em termos de resultados, o que é muito importante considerando tratar-se de um cálculo simplificado.

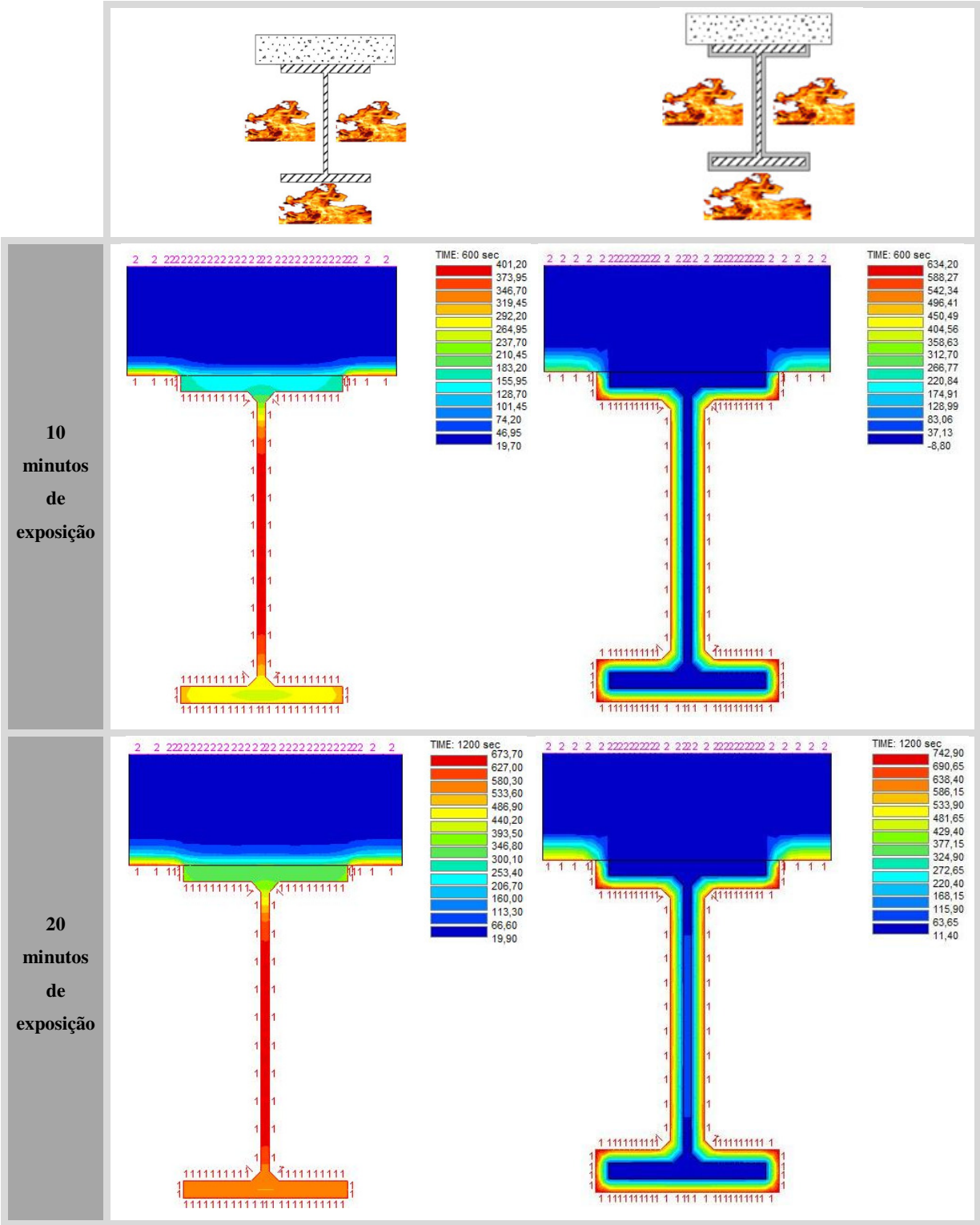
Mais uma vez, constata-se que o método prescrito pelo Eurocódigo 3, traduz-se para casos de simples aplicação, em resultados fiáveis apesar da simplificação do processo e redução do tempo de cálculo.

De seguida apresenta-se, na Tabela 5.6 a comparação entre a modelação de HEB600 sob laje de betão, com e sem protecção contra incêndio. Os diagramas de temperaturas apresentados foram extraídos utilizando o programa de pós-processamento DIAMOND – 2009.

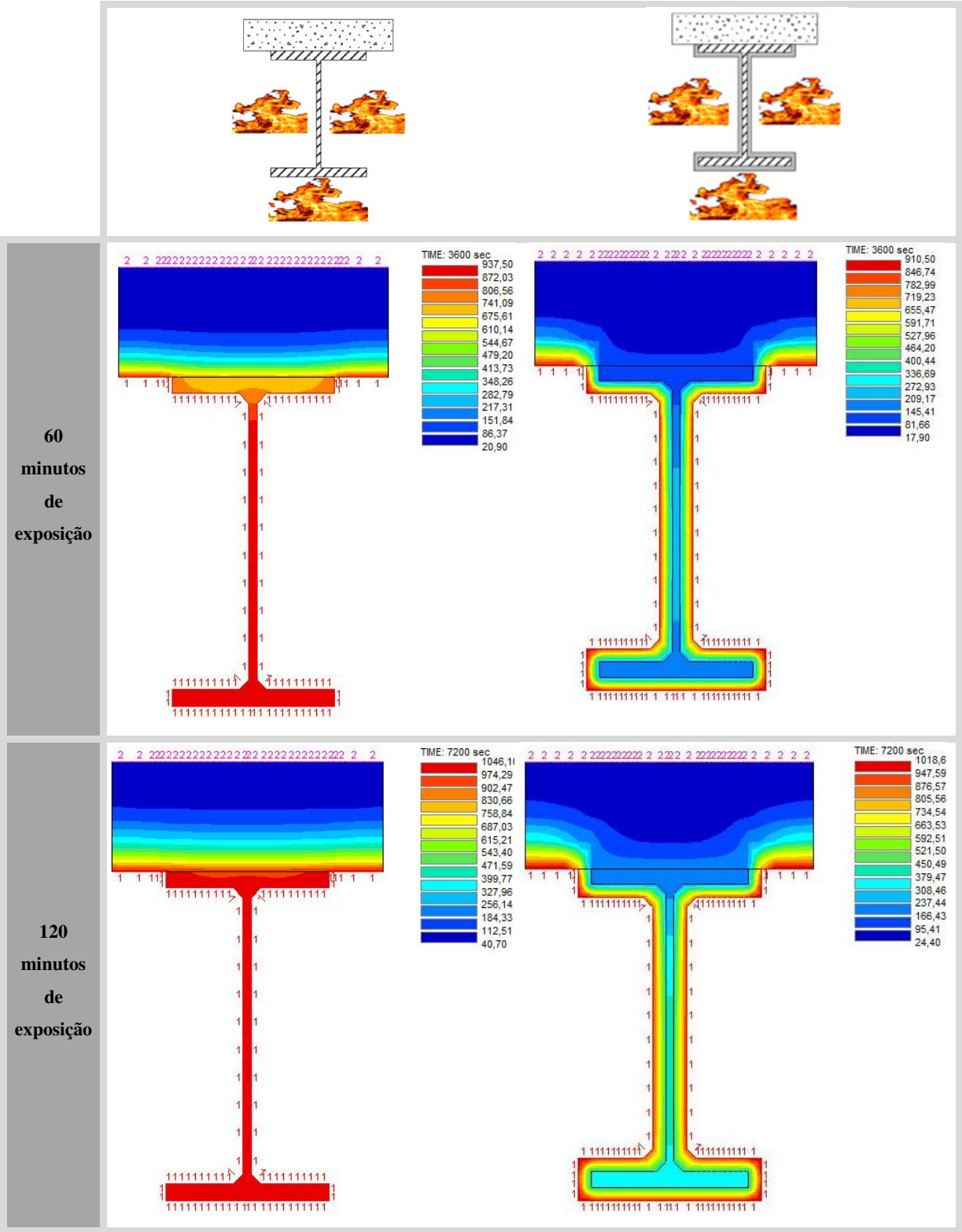
Evolução da Temperatura em Elementos de Aço Sujeitos ao Fogo

Evolução da Temperatura no Aço

Tabela 5.10 – Comparação da evolução da temperatura para perfil HEB600



Comparação da evolução da temperatura para perfil HEB600 (continuação)





## 6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Pode afirmar-se que o objectivo inicialmente traçado para esta dissertação, o estudo de carácter numérico da evolução da temperatura em elementos de aço e respectivas comparações com o Método Simplificado preconizado no Eurocódigo 3, Parte 1.2, foi atingido. Conseguiu-se ainda analisar e compreender o peso do factor de massividade na evolução da temperatura dos elementos, tendo esta influência directa no cálculo utilizando o Método Simplificado.

A pesquisa e análise bibliográfica potenciaram a compreensão dos conceitos inerentes ao estudo da evolução da temperatura, considerando o incêndio quer como fenómeno natural quer como curva normalizada. Permitiram ainda aprofundar os conhecimentos sobre os mecanismos de transferência de calor associados a este problema e aumentar o conhecimento sobre as propriedades térmicas de materiais estruturais e de isolamento.

Foram apresentados neste trabalho dois métodos de cálculo para a evolução da temperatura ao longo do tempo em estruturas metálicas: o Método Simplificado, que tem como base as normas em vigor, e o método numérico, utilizando o programa de cálculo automático SAFIR – 2007.

O Método Simplificado tem a vantagem de prescindir do uso de programas sofisticados de computador, de poder ser empregue para estruturas utilizando curvas temperatura-tempo nominais e de avaliar simplificada e o nível de protecção ao fogo utilizando materiais de protecção térmica conhecidos.

Como desvantagens desse método, pode-se citar a sua limitação a casos de distribuição uniforme de temperatura (em outras situações comuns na prática, o método deve ser utilizado com prudência), a sua elevada dependência directa do factor de massividade e a necessidade de se conhecerem as características físico-térmicas dos materiais de revestimento.

O método numérico, cuja aplicação neste trabalho se apoiou no programa SAFIR - 2007, tem as vantagens de ser válido para qualquer distribuição de temperaturas, podendo-se considerar a colaboração de lajes e paredes, e podendo ser empregue para novos materiais de revestimento, curvas temperatura-tempo naturais e estudos paramétricos.

Como desvantagens desse método, salientam-se: a necessidade de adquirir um programa de computador; as habituais dificuldades relacionadas com o tempo de cálculo e com o processamento de resultados, dependendo da complexidade dos problemas a analisar; e a necessidade de conhecer as características físicas e térmicas dos materiais de revestimento.



Observam-se pequenas diferenças de resultados entre os pontos estudados de cada perfil para exposições ao incêndio até 60 minutos, diferenças estas inversamente proporcionais ao factor de massividade. Estas diferenças são atenuadas quando se considera um tempo de exposição mais prolongado, verificando-se nessa situação uma excelente concordância entre os dois métodos.

Esta concordância é apenas posta em causa quando são contempladas diferentes condições de fronteira nas faces dos perfis estudados. As maiores diferenças entre o Método Simplificado e o programa de cálculo automático SAFIR – 2007 ocorreram nas modelações dos perfis sob laje de betão, assistindo-se a um posicionamento conservativo do Método Simplificado relativamente a três dos pontos considerados (Pontos A, B e C).

Como conclusão final, pode afirmar-se que, de um modo geral, a utilização do Método Simplificado preconizado no Eurocódigo 3, Parte 1.2, traduziu-se em resultados muito aceitáveis quando comparados com os obtidos através do programa de cálculo automático SAFIR – 2007. Em situações de simples aplicação, esse método pode pois resultar numa economia de tempo e de recursos.

De qualquer modo, para situações especiais, como o caso de perfis em contacto com outros materiais, é aconselhável levar a cabo uma análise mais elaborada, recorrendo aos programas de cálculo automático para avaliar o desempenho em condições de incêndio.

Relativamente à análise dos perfis dotados de materiais de protecção, a comparação entre os dois Métodos revelou resultados muito concordantes, excepção feita no caso do perfil sob laje de betão, caso este onde o Método Simplificado toma uma posição muito conservativa.

Como desenvolvimentos futuros, propõe-se o estudo de materiais de protecção contra incêndio e da sua influência na evolução da temperatura no perfil ao longo do tempo. Tal estudo poderá incidir com particular interesse em dois tipos de materiais, tintas intumescentes e elementos de madeira.

## 7. Bibliografia

ADAPTIC – Imperial College, Londres, 2000.

BATHE, K. – *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, New Jersey, 1996.

BUCHANAN A. H. – *Structural design for FIRE safety*. John Wiley & Sons, Chichester, 2002.

CLARET, A. M. – *Resistência ao fogo de vigas mistas aço-concreto modeladas pelo método dos elementos finitos*, Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural, numero XXIX, Punta Del Este, 2000.

CEFICOSS (*Computer Engineering of the Fire design of Composite and Steel Structures*) – Université de Liège, 2000.

DIAS, L. A. M. – *Estruturas de aço. Conceitos, técnicas e linguagem*. Zigurate, São Paulo, 2002.

DIAMOND - 2009 – Université de Liège, 2009.

DRYSDALE, D. – *An introduction to fire dynamics – Second Edition*. John Wiley & Sons, Chichester, 1998.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – ENV13381-4:2002 - *Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Applied protection to steel members*. CEN, Brussels, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – ENV 1991-1-2 - *Eurocode 1 – Actions on Structures – Part 1–2: Actions on structures exposed to fire*. CEN, Brussels, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – ENV 1993-1-2 - *Eurocode 3 – Design of Steel Structures – Part 1–2: General rules – Structural fire design*. CEN, Brussels, 2005.

FAKURY, R. H. – *Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio*. II Seminário Internacional – O uso de estruturas metálicas na construção civil. Belo Horizonte, 1999.

FOURIER, J. B. – *Théorie analytique de la chaleur*. Chez Firmin Didot, père et fils, 1822.

FRANSSEN, J.-M. – *Fire Design of Steel Structures*. ECCS – European Convention for Constructional Steel Work, Brussels, 2010.

GUERRA, A. M. – *Fenomenologia da combustão e extintores - Manual de Formação Inicial do Bombeiro*. Escola Nacional de Bombeiros, Sintra, 2003.

GID 10.0.4 – Programa desenvolvido pelo International Center for Numerical Methods in Engineering, Barcelona, 2010 (<http://gid.cimne.upc.es>).

ISO, International Organization for Standardization - ISO 834-1:1999 - *Fire – Resistance Tests – Elements of Building Construction*. ISO, Geneva, 1999.

KAEFER, C. K. – *Análise paramétrica de um incêndio conforme o novo Eurocode 1*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

LIENHARD V, J. H. - *A heat transfer textbook*, Phlogiston Press, Massachusetts, 2005.

LUDLUM, S. – *Pulitzer Prize, Spot News Photograph.*, New York Times, 2002. (<http://www.pulitzer.org/archives/5308>).

MENDES, C. L. – *Estudo sobre perfis formados a frio em situação de incêndio*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2004.

MOURA, E. – *Determinação de um modelo da taxa de carbonização transversal do grão para o Eucalyptus*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

RIBEIRO, J. C. L. – *Simulação via método dos elementos finitos da distribuição tridimensional de temperatura em estruturas em situação de incêndio*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, Belo Horizonte, 2004.

SAFIR – 2007 (*Structural Analysis of Fire Resistance*) - Université de Liège, 2007.

SAFIRWIZARD – Université de Liège, 2007.

SILVA, V. P. – *Determination of the temperature of thermally unprotected steel members under fire situations. Considerations on the section factor*. Latin American Journal of Solids and Structures 3, 2006, págs. 149–161.

SILVA, V. P. – *Estruturas de aço em situação de incêndio*. Zigurate, São Paulo, 2001.

SUPERTEMPCALC (TCD) – Fire Safety Design, Lund, 1997.

TWILT, L., LEUR, P.H.E.v.d., and BOTH, C. – *Characteristics of the heat transfer for calculating the temperature development in structural steelwork exposed to standard fire conditions under plate thermocouple control*. I Seminário Internacional - *Structures in Fire*, Copenhagen, 2001.

VARGAS, M. R.; SILVA, V. P. – *Resistência ao fogo das estruturas de aço*. Centro Brasileiro da Construção em Aço – CBCA, Rio de Janeiro, 2003.

VILA REAL, P. M. – *Incêndio em estruturas metálicas – cálculo estrutural*. Edições Orion, Alfragide, 2003.

VILA REAL, P. M. – *Modelação por elementos finitos do comportamento térmico e termo-elástico de sólidos sujeitos a elevados gradientes térmicos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Estrutural, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1988.

VULCAN – University of Sheffield, 2005 ([www.vulcan-solutions.com](http://www.vulcan-solutions.com)).

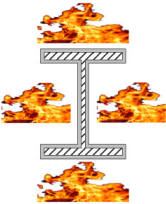
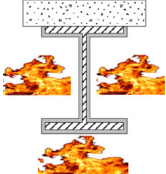
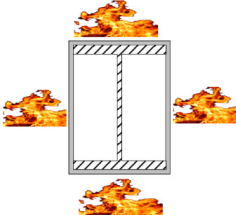
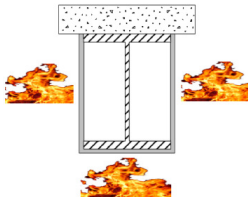
WANG, Y. C. – *Steel and composite structures - behaviour and design for fire safety*. Spon Press, London, 2002.



## **Anexos**

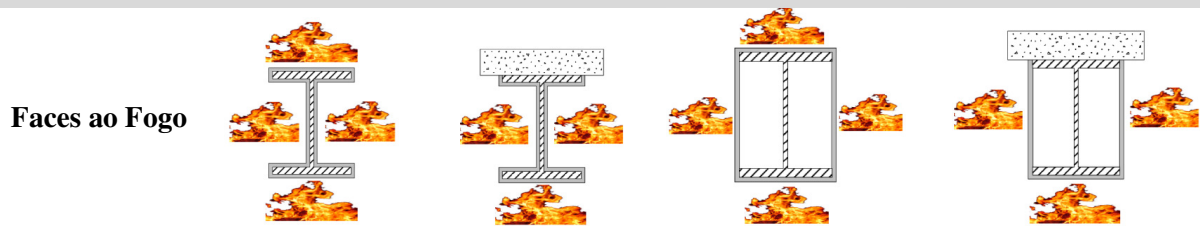


## Anexo I – Tabela Factores de Massividade

Fases ao Fogo	Contorno		Caixão	
	Factor de massividade [ $m^{-1}$ ]		Factor de massividade [ $m^{-1}$ ]	
				
<b>HE 100 AA</b>	354,6	290,5	244,9	180,8
<b>HE 100 A</b>	264,4	217,3	184,6	137,5
<b>HE 100 B</b>	217,9	179,5	153,6	115,2
<b>HE 100 M</b>	116,3	96,4	84,9	65,0
<b>HE 120 AA</b>	360,6	295,9	246,9	182,2
<b>HE 120 A</b>	267,4	220,0	184,7	137,4
<b>HE 120 B</b>	201,8	166,6	141,2	105,9
<b>HE 120 M</b>	111,2	92,2	80,1	61,1
<b>HE 140 AA</b>	341,7	280,9	232,8	172,0
<b>HE 140 A</b>	252,9	208,3	173,8	129,2
<b>HE 140 B</b>	187,5	154,9	130,4	97,8
<b>HE 140 M</b>	106,4	88,3	76,0	57,8
<b>HE 160 AA</b>	296,8	244,1	202,9	150,2
<b>HE 160 A</b>	233,7	192,5	160,9	119,7
<b>HE 160 B</b>	169,3	139,8	118,0	88,5
<b>HE 160 M</b>	100,0	82,9	71,3	54,2
<b>HE 180 AA</b>	278,7	229,5	190,0	140,7
<b>HE 180 A</b>	226,3	186,6	155,1	115,4
<b>HE 180 B</b>	159,0	131,4	110,3	82,8
<b>HE 180 M</b>	96,2	79,8	68,2	51,7
<b>HE 200 AA</b>	256,1	210,8	174,9	129,6
<b>HE 200 A</b>	211,0	173,9	144,9	107,7
<b>HE 200 B</b>	147,4	121,8	102,5	76,8
<b>HE 200 M</b>	91,6	76,0	64,9	49,2
<b>HE 220 AA</b>	242,3	199,6	165,2	122,4
<b>HE 220 A</b>	195,1	160,9	133,7	99,5

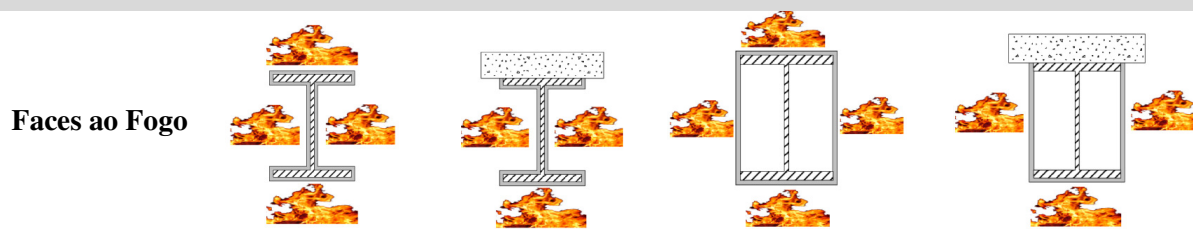
(Continua)



*(Continuação)*

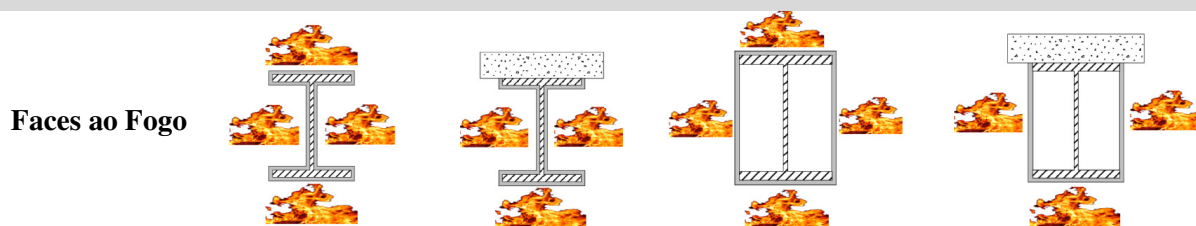
Perfil	Contorno		Caixão	
	Factor de massividade [m <sup>-1</sup> ]		Factor de massividade [m <sup>-1</sup> ]	
HE 220 B	139,5	115,3	96,7	72,5
HE 220 M	88,5	73,3	62,4	47,2
HE 240 AA	225,1	185,3	153,7	114,0
HE 240 A	178,2	146,9	122,3	91,1
HE 240 B	130,6	107,9	90,6	67,9
HE 240 M	73,1	60,7	51,9	39,5
HE 260 AA	213,7	176,0	146,2	108,5
HE 260 A	170,9	141,0	117,5	87,5
HE 260 B	126,5	104,6	87,8	65,9
HE 260 M	71,7	59,5	50,8	38,6
HE 280 AA	204,1	168,3	139,4	103,6
HE 280 A	164,8	136,0	113,1	84,3
HE 280 B	123,2	101,8	85,3	63,9
HE 280 M	70,5	58,5	49,8	37,8
HE 300 AA	191,7	158,0	131,1	97,4
HE 300 A	152,6	125,9	104,9	78,2
HE 300 B	116,2	96,0	80,5	60,4
HE 300 M	60,4	50,2	42,9	32,7
HE 320 AA	183,9	152,2	127,1	95,4
HE 320 A	141,2	117,0	98,1	74,0
HE 320 B	109,7	91,2	76,9	58,3
HE 320 M	59,8	49,9	42,8	32,9
HE 340 AA	176,8	146,9	123,4	93,5
HE 340 A	134,5	112,0	94,4	71,9
HE 340 B	105,9	88,3	74,9	57,3
HE 340 M	60,2	50,4	43,4	33,7

*(Continua)*

*(Continuação)*

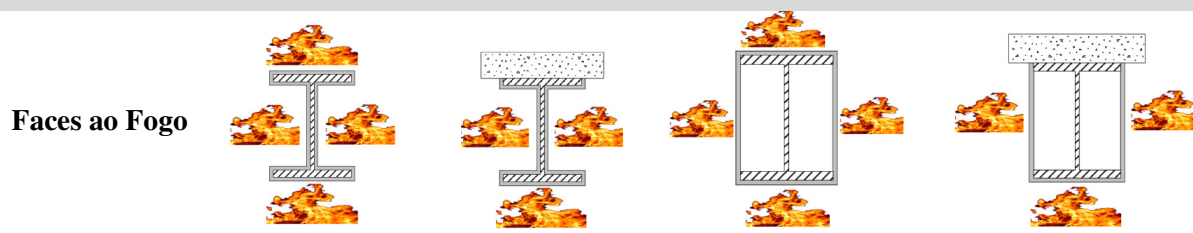
Perfil	Contorno		Caixão	
	Factor de massividade [m <sup>-1</sup> ]		Factor de massividade [m <sup>-1</sup> ]	
HE 360 AA	170,1	142,0	119,9	91,7
HE 360 A	128,4	107,4	91,1	70,0
HE 360 B	102,3	85,7	73,1	56,5
HE 360 M	60,7	51,0	44,1	34,4
HE 400 AA	160,6	135,1	115,2	89,7
HE 400 A	120,2	101,4	86,8	67,9
HE 400 B	97,4	82,2	70,8	55,6
HE 400 M	61,5	52,1	45,4	35,9
HE 450 AA	156,1	132,5	114,1	90,5
HE 450 A	112,9	96,1	83,1	66,3
HE 450 B	92,9	79,2	68,8	55,1
HE 450 M	62,5	53,3	46,8	37,7
HE 500 AA	151,7	129,8	112,8	90,9
HE 500 A	106,8	91,6	80,0	64,8
HE 500 B	89,0	76,5	67,0	54,5
HE 500 M	63,4	54,5	48,2	39,3
HE 550 AA	142,3	122,7	107,6	87,9
HE 550 A	104,3	90,1	79,3	65,2
HE 550 B	87,5	75,7	66,9	55,1
HE 550 M	64,3	55,7	49,6	40,9
HE 600 AA	138,5	120,2	106,2	87,9
HE 600 A	101,9	88,7	78,6	65,4
HE 600 B	86,0	74,9	66,7	55,6
HE 600 M	65,2	56,8	50,9	42,5
HE 600 x 337	56,1	48,9	43,9	36,7
HE 600 x 399	48,2	42,0	37,9	31,7

*(Continua)*

*(Continuação)*

Perfil	Contorno		Caixão	
	Factor de massividade [ $\text{m}^{-1}$ ]		Factor de massividade [ $\text{m}^{-1}$ ]	
HE 650 AA	134,8	117,7	104,7	87,6
HE 650 A	99,6	87,2	77,8	65,4
HE 650 B	84,6	74,1	66,4	55,9
HE 650 M	66,0	57,9	52,1	43,9
HE 650 x 343	57,1	50,1	45,2	38,1
HE 650 x 407	49,0	43,0	38,9	32,9
HE 700 AA	129,2	113,5	101,6	85,9
HE 700 A	96,2	84,6	76,0	64,5
HE 700 B	82,2	72,4	65,3	55,5
HE 700 M	66,8	58,9	53,3	45,3
HE 700 x 352	57,8	50,9	46,2	39,3
HE 700 x 418	49,5	43,6	39,7	33,9
HE 800 AA	121,8	108,0	97,9	84,2
HE 800 A	94,4	83,9	76,3	65,8
HE 800 B	81,2	72,2	65,8	56,9
HE 800 M	67,9	60,4	55,3	47,8
HE 800 x 373	58,6	52,1	47,8	41,3
HE 800 x 444	49,9	44,4	40,8	35,3
HE 900 AA	113,3	101,4	92,8	80,9
HE 900 A	90,4	81,0	74,3	64,9
HE 900 B	78,4	70,3	64,6	56,6
HE 900 M	69,3	62,1	57,2	50,1
HE 900 x 391	59,7	53,5	49,4	43,2
HE 900 x 466	50,7	45,5	42,1	36,9
HE 1000 AA	108,3	97,7	90,0	79,4
HE 1000 A	89,2	80,6	74,4	65,7

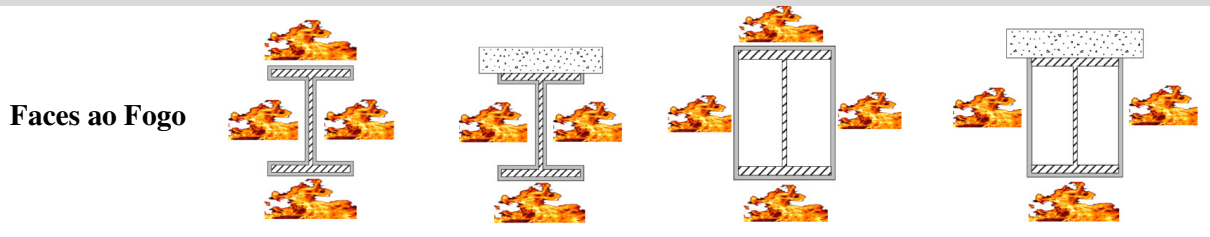
*(Continua)*

*(Continuação)*

Perfil	Contorno		Caixão	
	Factor de massividade [m <sup>-1</sup> ]		Factor de massividade [m <sup>-1</sup> ]	
HE 1000 B	77,8	70,3	65,0	57,5
HE 1000 M	70,5	63,7	59,0	52,2
HE 1000 x 393	62,8	56,8	52,7	46,7
HE 1000 x 409	60,7	54,8	50,9	45,0
HE 1000 x 488	51,5	46,5	43,3	38,3
HE 1000 x 579	44,2	39,9	37,2	32,9
HL 920 x 342	78,3	68,7	61,0	51,4
HL 920 x 365	73,8	64,8	57,5	48,5
HL 920 x 387	69,7	61,2	54,4	45,9
HL 920 x 417	64,9	57,0	50,7	42,8
HL 920 x 446	60,9	53,5	47,6	40,2
HL 920 x 488	56,0	49,2	43,9	37,1
HL 920 x 534	51,5	45,2	40,4	34,2
HL 920 x 585	47,3	41,6	37,2	31,5
HL 920 x 653	42,8	37,6	33,7	28,5
HL 920 x 784	36,3	31,9	28,7	24,3
HL 920 x 967	30,0	26,4	23,9	20,3
HL 1000 x 296	92,3	81,7	73,3	62,7
HL 1000 A	85,5	75,7	68,0	58,2
HL 1000 B	74,4	65,9	59,3	50,8
HL 1000 M	67,3	59,7	53,8	46,1
HL 1000 x 477	58,4	51,7	46,8	40,1
HL 1000 x 554	50,8	45,0	40,8	35,0
HL 1000 x 642	44,3	39,3	35,7	30,7
HL 1000 x 748	38,5	34,2	31,2	26,8
HL 1000 x 883	33,2	29,4	26,9	23,2

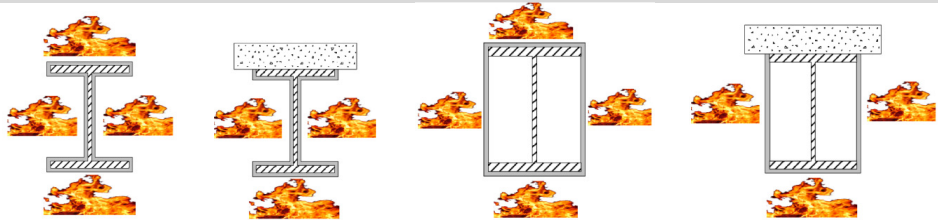
*(Continua)*

(Continuação)



Perfil	Contorno		Caixão	
	Factor de massividade [m <sup>-1</sup> ]		Factor de massividade [m <sup>-1</sup> ]	
HL 1100 A	85,0	75,8	68,3	59,1
HL 1100 B	75,0	66,9	60,4	52,3
HL 1100 M	68,0	60,7	54,8	47,5
HL 1100 R	59,3	53,0	48,0	41,6

Fases ao Fogo				
	Perfil	Contorno		Caixão
		Factor de massividade [m <sup>-1</sup> ]		Factor de massividade [m <sup>-1</sup> ]
IPE A 100	451,9	389,3	348,5	285,9
IPE 100	387,3	334,0	300,3	247,0
IPE A 120	427,6	369,5	329,3	271,3
IPE 120	359,7	311,3	278,6	230,1
IPE A 140	408,6	354,1	314,2	259,7
IPE 140	335,2	290,7	259,3	214,9
IPE A 160	382,3	331,6	295,4	244,8
IPE 160	309,9	269,0	240,9	200,1
IPE A 180	354,5	308,0	273,8	227,3
IPE 180	291,5	253,5	226,3	188,3
IPE O 180	260,0	226,1	202,2	168,3
IPE A 200	325,7	283,1	253,1	210,5
IPE 200	269,7	234,6	210,6	175,5
IPE O 200	243,7	211,8	190,2	158,3
IPE A 220	298,5	259,6	231,5	192,5
IPE 220	254,0	221,0	197,8	164,8
IPE O 220	229,5	199,6	178,7	148,7
IPE A 240	275,5	239,5	214,3	178,3
IPE 240	235,7	205,0	184,1	153,4
IPE O 240	213,3	185,4	166,5	138,6
IPE A 270	264,9	230,5	205,4	170,9
IPE 270	226,6	197,2	176,3	146,9
IPE O 270	195,3	170,0	152,3	127,1
IPE A 300	248,5	216,2	192,2	159,9
IPE 300	215,6	187,7	167,2	139,4
IPE O 300	186,9	162,7	145,2	121,0
IPE A 330	228,4	199,2	177,9	148,7
(Continua)				
(Continua)				

Fases ao Fogo	Contorno		Caixão	
	Perfil	Factor de massividade [ $\text{m}^{-1}$ ]	Factor de massividade [ $\text{m}^{-1}$ ]	
	IPE 330	200,3	174,8	156,5
	IPE O 330	174,6	152,3	136,6
	IPE A 360	211,2	184,6	165,0
	IPE 360	186,0	162,7	145,7
	IPE O 360	162,4	142,0	127,4
	IPE A 400	200,3	175,7	157,9
	IPE 400	173,7	152,3	137,3
	IPE O 400	153,6	134,7	121,6
	IPE A 450	187,4	165,1	148,9
	IPE 450	162,4	143,2	129,5
	IPE O 450	137,9	121,5	110,2
	IPE A 500	172,2	152,4	137,9
	IPE 500	150,9	133,6	121,2
	IPE O 500	128,7	114,0	103,6
	IPE A 550	159,8	141,9	129,1
	IPE 550	139,6	124,0	113,1
	IPE O 550	121,3	107,7	98,4
	IPE A 600	146,9	130,9	119,3
	IPE 600	129,2	115,1	105,1
	IPE O 600	103,9	92,5	84,8
	IPE 750 x 147	133,9	119,8	108,6
	IPE 750 x 173	114,5	102,4	93,0
	IPE 750 x 196	101,7	91,0	82,8

## **Anexo II - Ábacos**





